

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Veneteknologian koulutusohjelma

Markos Puro

LUJUUSOPIN SOVELTAMINEN TUOTEKEHITYKSESSÄ

Opinnäytetyö 2015

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Veneteknologian ko.

Markos Puro	Lujuusopin soveltaminen tuotekehityksessä
Opinnäytetyö	50 sivua + 49 liitesivua
Työn ohjaaja	Terho Halme
Toimeksiantaja	Mobimar Oy
Marraskuu 14	
Avainsanat	FEM, lujuusoppi, huoltoalus, tuulivoimala, vene

Nykyaikaisilla suunnitteluohjelmilla lujuusoppia voidaan käyttää tuotekehityksessä yhtä aikaa muun suunnittelun kanssa. Käytetyimmät 3D-suunnitteluohjelmat sisältävät lujuuslaskenta lisäosan, joissa suunniteltaville kappaleille voidaan tehdä reaaliaikainen lujuusanalyysi suunnittelun edetessä. Tuotekehityksen tarkoituksena oli selvittää, voidaanko tuulivoimalan huoltoaluksen tartuntajärjestelmän rungon materiaali vaihtaa teräksestä alumiiniin, minkä myötä kappaleen painoa saataisiin pienemmäksi. Suunnittelu työ tehtiin käyttämällä SolidWorks-ohjelmaa ja sen Simulation FEM-laskentaisäosaa.

Tuotekehityksen pohjana käytettiin valmiina olevaan tartuntajärjestelmän prototyyppiä ja siitä tehtyjä mittauksia ja laskelmia. Tartuntajärjestelmän prototyypin mittauksissa oikeissa käyttöolosuhteissa saatiin 56 % pienemmät voimat kuin prototyypin suunnittelun pohjana käytetyissä laboratoriomittauksissa. Tämän myötä alkuperäisen prototyypin rakenteita voitiin hieman keventää.

Tuotekehityksen myötä saatiin kevennettyä rakennetta ja vaihdettua rungon materiaali teräksestä alumiiniin. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi suunnitteluprosessissa vaadittavat teoriat ja työkalut. Lisäksi tuodaan ilmi suunnitteluprosessissa olevat haasteet. Tässä opinnäytetyössä ei näytetä lopullisia suunnittelu- ja laskentatuloksia materiaalin luottamuksellisuuden vuoksi.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Boat engineer

PURO, MARKOS

Strength calculation of the development project

Bachelor's Thesis

50 pages + 49 pages of appendices

Supervisor

Terho Halme, lecturer

Commissioned by

Oy Mobimar Ltd.

November 2014

Keywords

FEM, strength calculation, wind farm vessel, boat

The modern and most popular 3D-programs are equipped with strength calculation programs where real time strength calculations can be made during other design process. Topic of this product development project was to found out if the weight of the wind farm vessel's gripping system can produce lighter by changing material of the system from steel to aluminum and make the structure thinner. Engineer work was made by using SolidWorks program and Simulation FEM-analysis program that is an additional part of the SolidWorks.

Ready-made prototype and measures and calculations of the prototype engineer process were used as a base of the project's engineer work. In the operation test of the prototype results have shown that concrete strength of the structure was 20% lighter than original values of the prototype which were measured in the laboratory. On this account new structure could be engineered with lighter material.

As a result of the product development project, a lighter structure to gripping system was engineered. Because of this, material of structure could be changed from steel to aluminum and is made thickness' thinner the parts of the gripping system. Detailed results of the calculations and engineer process are not shown because it is classified material. Because of this, in rapport is dealt only tools, methods and theory of the engineer project. Additionally, challenges of project are discussed.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	6
1.1	Työskentelymetodit ja välineet	6
1.2	Tutkimuksen taustaa	6
2	TOIMEKSIANTO	7
2.1	Mobimar Oy	7
2.2	Mobimar 18 Wind	7
2.3	Gripperi	11
2.4	Toimintaperiaate	11
2.5	Tutkimus	13
3	LUJUUSOPIN PERUSTEET	13
3.1	Mekaanisen mallin muodostaminen	13
3.2	Lujuusopin peruskäsitteitä	14
3.2.1	Normaalijännitys	14
3.2.2	Suhteellinen venymä	15
3.2.3	Jännityksen ja venymän välinen yhteys	15
3.2.4	Varmuusluku	16
3.2.5	Leikkausjännitys	16
3.2.6	Taivutus	17
3.3	Von Misesin lujuushypoteesi	17
4	LUJUUSOPIN ELEMENTTIMENETELMÄN PERUSTEET	18
4.1	Historia ja tausta	18
4.2	Perusteet	19
4.3	FEM-analyysi	20
4.4	Materiaali	21
5	TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU	23
5.1	Parametrinen piirremallinnus	23
5.2	SolidWorks	26
5.3	Mathcad	26

6 FEM-ANALYYSI	27
6.1 Lähtötilanne	28
6.2 Kytkentään vaikuttavat voimat	28
6.3 Lasketut analyysit	31
6.4 Voimat ja reunaehdot	32
6.4.1 Runkorakenteen reunaehdot	32
6.4.2 Runkorakenteen voimat	33
6.4.3 Sisempi vipuvarren reunaehdot ja voimat	34
6.4.4 Tarraimen voimat ja reunaehdot	35
6.5 Verkotus	36
7 TULOKSET	37
7.1 Runkorakenteen Von Misesin yhdistetyt jännitykset	37
7.2 Runkorakenteen leikkausvoimat	39
7.3 Vipuvarren tulokset	41
7.4 Tarraimien tulokset	42
7.5 Törmäys keskelle	42
7.5.1 Törmäysvoima	43
7.5.2 Törmäystilanteen reunaehdot ja voimat	43
7.5.3 Tulokset	44
8 YHTEENVETO	45
8.1 Teoria	45
8.2 Suunnittelu	46
8.3 Loppusanat	47
LÄHTEET	48
LIITTEET	49
Liite 1 Gripper raportti 43 sivua (salainen)	49
Liite 2 Mathcad laskelmat 4 sivua (salainen)	49
Liite 3 Rakenne erittely 2 sivua (salainen)	49

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, onko mahdollista vaihtaa tuulivoimalan huoltoaluksen (Mobimar 18 wind) tartuntajärjestelmän rungon materiaali teräksestä alumiiniin. Opinnäytetyö tehtiin laitteen valmistajalle Mobimar Oy:lle. Opinnäytetyössä optimoidaan olemassa olevaa rakennetta keventämällä rakennetta ja vaihtamalla materiaali teräksestä alumiiniin.

Tartuntajärjestelmän eli Gripperin prototyypin ja rakennelaskelman on alun perin tehnyt turkulainen insinööritoimisto. Prototyyppi on osoittautunut tarkoituksen mukaiseksi ja toimivaksi. Laitteen valmistajan ja käyttäjän kanssa käydyissä keskusteluissa tuli ilmi, että prototyyppikappale on tarkoitukseensa nähden hieman liian painava ja vankkarakenteinen. Tämän takia oli tarve keventää laitteen rakennetta.

1.1 Työskentelymetodit ja välineet

Materiaalin vaihdon ja rakenteiden kevennyksen myötä kappaleelle täytyi tehdä uusi lujuustarkastelu. Käytännön suunnittelutyö tehtiin SolidWorks suunnitteluohjelmalla. Lujuustarkastelut tehtiin SolidWorksin Simulation-ohjelmalla, jolla kappaleen aikaisemmatkin tarkastelut oli tehty.

SolidWorks on erittäin monipuolinen 3D-suunnitteluohjelma, josta löytyy monenlaisia työkaluja. SolidWorks Simulation on lisätyökalu, jolla voidaan suorittaa suunniteluille kappaleille FEM-laskenta. Tämä ohjelma ei kuitenkaan ole helppokäyttöisin ja soveltuvin monimutkaisten rakenteiden laskentaan. Tämän takia tässä tutkimuksessa jokaiselle kappaleelle tehtiin oma lujuusanalyysi. FEM-laskennassa käytettyjen voimien laskemiseen käytettiin Mathcad-ohjelmistoa.

1.2 Tutkimuksen taustaa

Työskentelyn alussa käytiin läpi Gripperiä käyttäneiden ihmisten tekemät raportit ja VTT:n meriolosuhteissa tekemät tutkimukset. Näistä raporteista saatiin todellisudessa kappaleeseen vaikuttavat voimat, jotka korvasivat prototyypissä käytetyt arvioitavat voimat.

Lujuuslaskenta pohjautui hyvin vahvasti insinööritoimiston tekemään raporttiin. Raportissa on käyty läpi Gripperin ensimmäisen version lujuuslaskenta ja analysoitu sen tulokset. Raportissa on kerrottu alkuperäisessä laskennassa käytetyt arvot, kappaleeseen kohdistuvat voimat, kappaleiden kontaktipinnat ja käyty läpi toimiston saamia tuloksia.

Gripperi on yksi Mobimarin kilpailuvaltti kilpailijoihin nähden, joten yksityiskohtaisia tietoja siitä ja tuotekehityksestä ei haluttu laittaa tähän opinnäytetyöhön. Tämän takia tässä opinnäytetyössä keskitytään lähinnä tuotekehitysmetodeihin ja työkaluihin. Toimeksiantajalle on tehty erillinen raportti valmistuneesta tuotekehityksestä. Raportti on tämän opinnäytetyön liitteenä.

2 TOIMEKSIANTO

2.1 Mobimar Oy

Turkulainen Mobimar Oy on työveneisiin erikoistunut meritekniikkayritys. Mobimarilla työskentelee noin 50 henkilöä. Yrityksessä suunnitellaan ja valmistetaan korkealaatuisia veneitä eri aloille ympäri maailmaa. Veneitä valmistetaan mm. meripelastuskäyttöön, huoltoaluksiksi, tutkimusaluksiksi ja luotsiveneiksi. (Mobimar Oy, 2014)

Viime vuosina yritys on panostanut trimaraanirunkoisiin aluksiin. Veneiden lisäksi yrityksessä valmistetaan septi- ja öljyntorjuntajärjestelmiä sekä turstisukellusveneitä. Lisäksi yrityksellä on alihankinta töitä eri laivatelakoille. (Mobimar Oy, 2014)

2.2 Mobimar 18 Wind

Vuonna 2012 Mobimar luovutti ensimmäisen tuulivoimaloiden CTV-huoltoaluksen. CTV-alus on trimaraanirunkoinen, ja siinä on tartuntajärjestelmä, jolla alus voi turvallisesti kiinnittyä tuulivoimalaan vaativissakin sääolosuhteissa. Tällöin tuulivoimalan huoltohenkilöstö voi turvallisesti kulkea tuulivoimalaan.

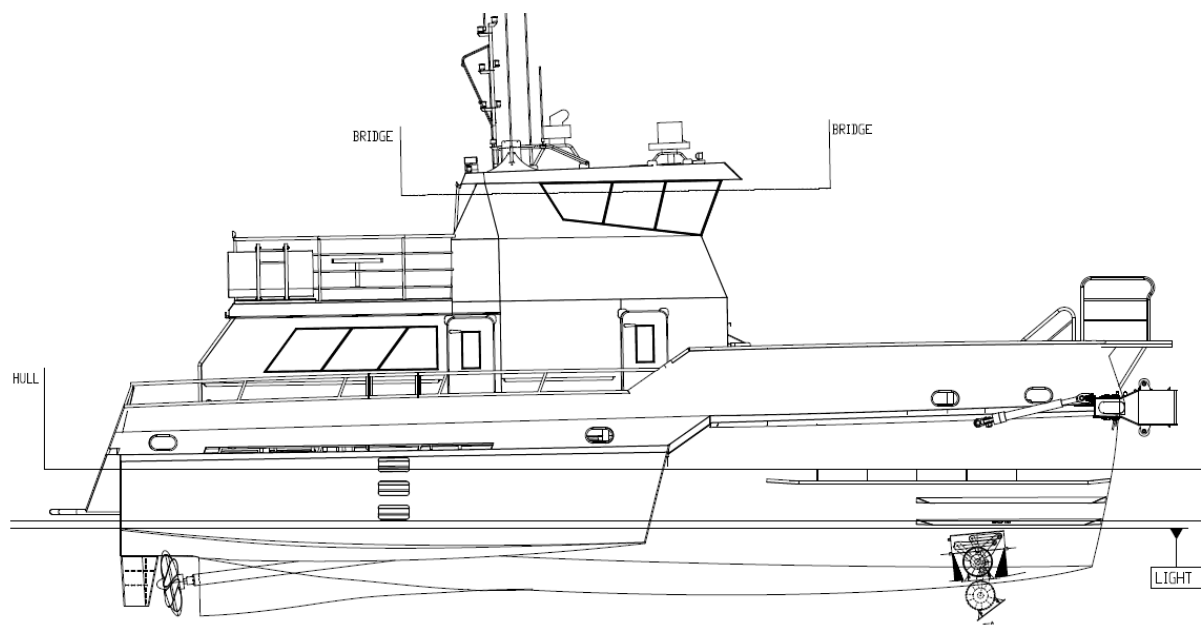
Aluksella voidaan kuljettaa huoltohenkilöstä ja -varusteita sekä tuulivoimaloiden varaosia. Aluksen runko on optimoitu huoltotöihin ja olosuhteisiin soveltuvaksi trimaraaniksi. Trimaraani rungolla eri kuormitustilanteilla ei ole vaikutuksia aluksen nopeuteen, koska vierekkäiset rungot lisäävät aluksen vakavuutta, joten alus pysyy hyvin

optimi kulkuasennossa. Kapeammat rungot ovat kulkuvastuksen pienuuden takia polttoainetaloudellisimpia. Kolme runkoa mahdollistavat suuremman työskentelykannen, mikä taas parantaa aluksen hyötykuormaa. (Kuva 1, 2 ja 3.) Aluksen tekniset tiedot ovat eritelty taulukossa 1.

Taulukko 1. Mobimar 18 wind tekniset tiedot

Pituus L_h :	18 m
Leveys B_h :	8,5 m
Syväys D_h :	1,6 m
Uppouma D:	36 t
Uppouma kuormaamattomana:	30 t
Valmistusmateriaali:	Alumiini
Moottorit:	2 x 650 kW
Aux.moottori:	23 kVA
Propulsio:	2 x potkuri
Ohjailu potkuri:	50 kW hydraulinen keulapotkuri.
Työskentelykannen ala:	30 m ²
Moottori teho ABT:	750 kW
Kulkunopeus matka/maksimi:	24/28 kN
Polttoainemäärä:	4000 l
Toimintasäde	300 NM
Kuljetuskapasiteetti:	6 t
Henkilömäärä:	2-3 miehistössä + 12 matkustajaa

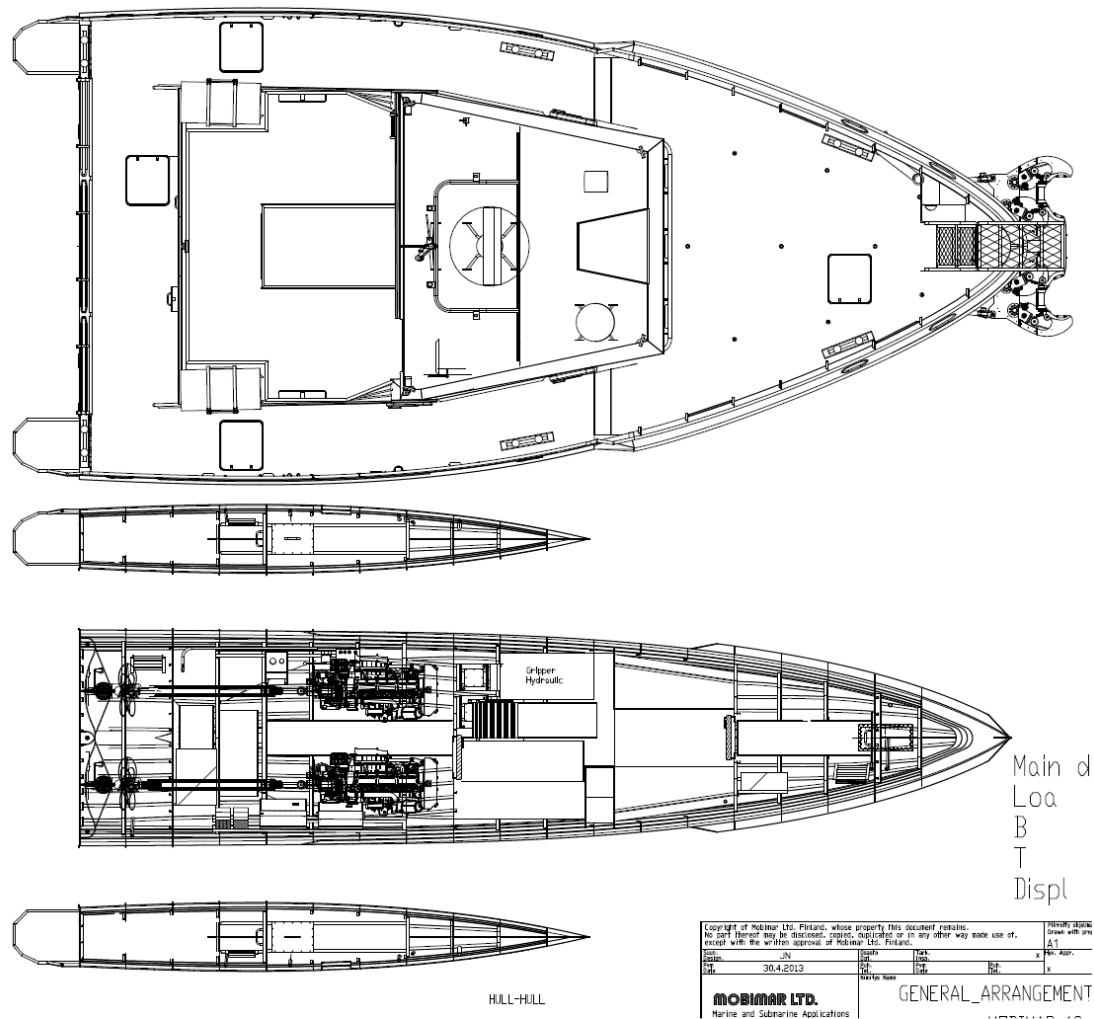
(Immonen, 07/2012)



Kuva 1. Mobimar 18 Wind



Kuva 2. Mobimar 18 wind-valokuva



Kuva 3. Mobimar 18 Wind -lay-out

Aluksen komentosilta on suunniteltu yhden ihmisen käyttöön. Siellä on kuitenkin istuimet ja ohjauspisteet konemestarille ja perämiehelle. Alusta ohjataan joystick -kontrollijärjestelmällä, mikä helpottaa kiinnittymis-, rantautumis- ja manoveeraustilanteissa. Järjestelmä ohjaa keulapotkuria ja kahta käyttöpotkuria. Joystickin avulla on helppo ohjata alusta kuljettajan haluamaan suuntaan. Aluksen autopilotti on integroitu samaan järjestelmään.

Matkustamoalue sijaitsee pääkannen tasolla. Matkustamo on varustettu perustasoisella pentterillä ja matkustusalueella on lisäksi tuolit matkustajille. Lisäksi aluksessa on wc, peseytymistilat ja kaksi makuukajuutaa. Sisätiloihin voidaan tarvittaessa tehdä huoltilat.

Alus on varustettu kahdella meridieselillä ja perinteisellä akselivedolla. Lisäksi aluksessa on rungon sisään menevä keulapotkuri.

Alus on rakennettu käytettäväksi matalalla aallokolla, koska alukseen on haluttu korkea matkanopeus ja tehdä mahdollisimman kevyet rakenteet. Alus on suunniteltu seas-tate 5 -luokkaan, jolloin tuuli on alle 8 Bft ja aallokko alle 4 m. Alus on suunniteltu siten että sillä mahdollisuus tehdä myös muita töitä rannikko ja satama-alueilla. Aluk-sen runkotyypistä johtuen työskentelykansi on 30 m²:n kokoinen. (Immonen, 07/2012)

2.3 Gripperi

Alus on varustettu tartuntajärjestelmällä (Gripper) joka tekee tuulivoimaloihin kiinnit-tymisen helpommaksi ja turvallisemmaksi. Gripperin avulla saadaan n. 20-30 % lisää operointipäiviä vuodessa

Gripperin avulla alus on kiinteästi kiinni tuulivoimalan rungossa. Laite myös vaimen-taa aallokon aiheuttamaa keinutusta ja pitää näin työskentely olosuhteet huoltomie-hille turvallisina. Huoltohenkilöstöä, työkaluja ja varaosia voidaan saada tuulivoima-lalle yli 2,5 m merkitsevällä aallonkorkeudella.



Kuva 4. Gripperi

2.4 Toimintaperiaate

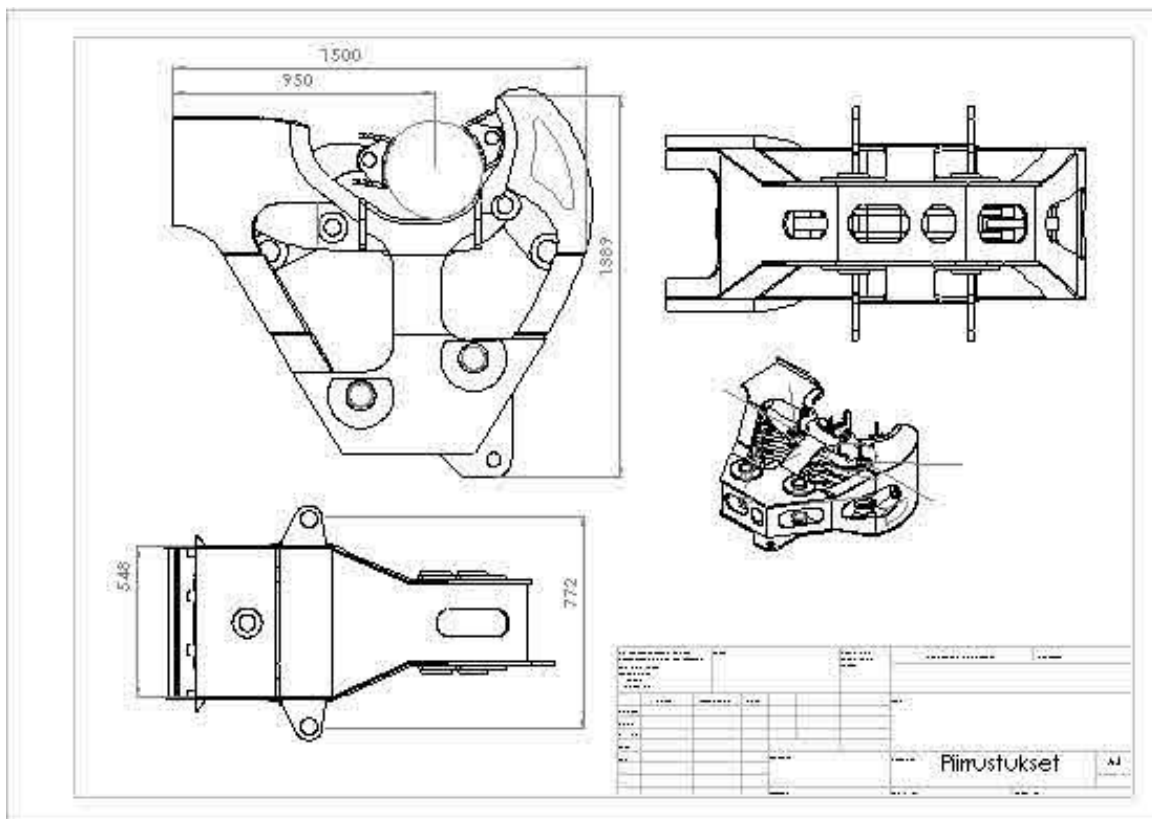
Gripperin rakenne koostuu neljästä erillisestä hydraulisesti ohjattavasta tartunta-kourasta, joiden avulla alus kiinnittyy tuulivoimalan huoltoputkiin (kuva 4). Tartunta-kourat mahdollistavat joko aluksen liikkeen ylös ja alas aaltojen mukana, tai alus voi-

daan lukita aallon huipun korkeudelle, jolloin voidaan taata turvallinen kulku tuulivoimalaan.

Laitetta käyttää aluksen kippari komentosillalta, jossa on laitteen ohjausjärjestelmä. Gripperi on varustettu tietokonejärjestelmällä, joka kertoo Gripperiin kohdistuvat kuormituksen ja aallonhuipun paikan. Järjestelmän avulla kapteeni voi siten etsiä parhaimman kiinnityskorkeuden.

Gripperi on kiinnitetty keskeltä huoltoalukseen putkella ja nivelellä, jotka mahdollistavat kiertymisen vaaka- ja pystysuunnassa. Vaakakiertymistä on vaimennettu Gripperin sivuilta alukseen kylkeen kiinnitettävillä hydraulisylintereillä.

Gripperin alkuperäisen rakenteen on suunnitellut suunnittelu toimisto, joka on myös tehnyt kappaleen lujustarkastelut. VTT on tehnyt mittaukset laitteeseen kohdistuvista voimista. Mittaukset ovat tehty sekä pienoismallilla laboratorio-olosuhteissa että kappaleen valmistuttua venymäliuskojen avulla oikeissa käyttö-olosuhteissa merellä. Laite on toiminut käytössä hyvin. Suurin ongelma ja oikeastaan ainoa prototyypissä on sen paino. Lisäksi Gripperistä täytyisi suunnitella sellainen, että se voitaisiin irrottaa helposti aluksesta huolto toimenpiteitä varten. (Immonen, 07/2012)



Kuva 5. Gripperin puolikas

2.5 Tutkimus

Opinnäytetyön tutkimusosiossa keskityttiin Gripperin kehittämisessä ainoastaan keventämiseen. Muut Gripperin tuotekehitysasiat on ajateltu tehdä myöhemmin. Kevennäminen aloitetaan tekemällä nykyiselle laitteelle lujuustarkastelu siten, että vaihdetaan laitteen materiaali teräksestä alumiiniksi ja optimoidaan rakenne uuden materiaalin mukaan. Käytettävä alumiini on AlMg 4,5-mn:n alumiini. Lisäksi kappaleen pienosat mm. heloitus, kiinnityspultit ja -tapit suunnitellaan ruostumattomasta teräksestä.

Aikaisemmat lujuuslaskelmat osoittavat että nykyisellä rakenteella laitteelle tulee jännityksiä, jotka eivät sovellu alumiinille, joten rakenteita täytyy vahvistaa joltain osin. Tämä tarkoittaa sitä että Gripperin rakennetta täytyy osittain suunnitella uudelleen, siten että se kestää kuormitukset.

Kappaleeseen vaikuttavat jännitykset lasketaan tilanteissa, jossa tartutaan kiinni kahteen halkaisijaltaan 360 mm olevaan suojaputkeen, jotka ovat 1700 mm:n ja 1900 mm:n päässä toisistaan, ja tilanteessa, jossa alus törmää tuulivoimalaan tartuntakourien kohdalta tai laitteen nurkasta. Voimina käytetään arvoja, joita VTT on saanut omissa mittauksissaan. Törmäysvoima lasketaan aluksen massan mukaan. (Immonen, 07/2012)

3 LUJUUSOPIN PERUSTEET

Lujuusoppi on nomoteettinen eli lakeja etsivä tieteenala. Se on fysiikan osa, yksi mekaniikan alahaara. Lujuusopin tavoitteena on tarkastella rakenteita siten että ne kestäisivät erilaiset rasiutilanteet. Lujuusoppi perustuu materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin eli mekaniikan sekä statiikan yleisiin periaatteisiin. Tarkoituksena on selvittää kiinteän kappaleen mekaanista käyttäytymistä hallitsevia lakeja ja soveltaa näitä tietoja koneenosien ja rakenteiden mitoittamiseen.

Todellisten rakenteiden lujuusopillinen analyysi tehdään käyttämällä näitä rakenteita kuvaavia yksinkertaisia matemaattisia malleja, jotka pyrkivät ottamaan huomioon tärkeimmät kokeellisesti havaitut yhteydet. Lujuuslaskennat tuloksena on tarkoitus saada hinnaan optimoitu tekniset vaatimuksen täyttävä rakenne. (Outinen Hannu, 2004)

3.1 Mekaanisen mallin muodostaminen

Lujuusoppi on kehittyvä tieteenala, jonka teoria ei ole vielääkään valmis. Tämän takia

todellista ongelmaa pelkistetään, siten että laskettava analyysi saadaan tarpeeksi yksinkertaiseksi laskea. Laskentamalli yksinkertaistetaan todellisesta mallista seuraavilla tavoilla: 1. Kappaletta tai geometriaa yksinkertaistamalla. 2. Annettuja kuormia idealisoimalla. 3. Materiaaliominaisuuksia yksinkertaistamalla.

Todellisuudessa rakenne ja geometria pitäisi aina esittää kolmiulotteisena, mutta käytännössä ne esitetään yleensä palkkeina, levyinä, akseleina tai laattoina. Todellisten kuormien sijaista käytetään idealisoituja viiva- tai pistekuormia. Materiaaliominaisuudet yleensä yksinkertaistetaan siten, että materiaalin ominaisuudet eivät muutu kappaleen sisällä. Analyysia suunniteltaessa on tärkeä tajuta, mikä on tarkoituksenmukainen tarkkuus ja mikä ei. Mitä tarkempi on laskenta, sitä kalliimpi ja hitaampi se on. (Outinen Hannu, 2004)

3.2 Lujuusopin peruskäsitteitä

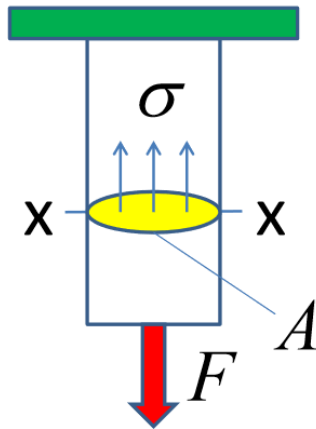
Lujuusopissa käytetään seuraavia käsitteitä: normaalijännitys, suhteellinen venymä, leikkajännitys ja taivutus. Jännityksen yksikkö SI-järjestelmässä on N/m^2 eli pascal, Pa. Pascal on kuitenkin niin pieni yksikkö, että lujuusopissa esiintyvät tavallisesti sen kerrannaiset MPa (N/mm^2) ja GPa (kN/mm^2). (Karhunen J, 2006)

3.2.1 Normaalijännitys

Normaalijännitys ja venymä on yksi lujuusopin tärkeimmistä käsitteistä, ja sen yhteys muodonmuutokseen on merkittävä. Jos sauvaa kuormitetaan voimalla F , sauvan poikkileikkaukseen syntyy rasitukseksi normaalivoima N , joka on tasapainoyhtälöiden mukaan yhtä suuri kuin voima F .
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Todellisuudessa normaalivoima ei vaikuta poikkileikkauksessa yhdessä pisteessä, vaan leikkauspintaan syntyy voimajakauma, jonka yhteistulos on normaalivoima N . Jakautuneen voiman kuormitustiheyttä N/A kutsutaan jännitykseksi. A on poikkileikkauksen pinta-ala. Normaalivoimaa vastaavasta jännityksestä käytetään nimitystä normaalijännitys σ .

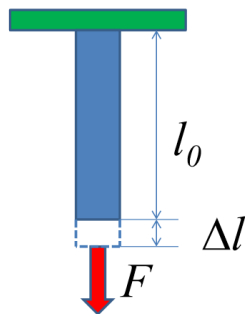
Normaalijännityksen etumerkki valitaan normaalivoiman mukaisesti. Jos normaalivoima on leikkauspinnasta poispäin (veto), normaalijännitys on positiivinen, ja jos normaalivoima on leikkauspintaan päin (puristus), normaalijännitys on negatiivinen. (Outinen Hannu, 2004)



Kuva 6. Sauvaan kohdistuva normaalijännitys σ pinnassa x-x (Halme)

3.2.2 Suhteellinen venymä

Kun kappaletta venytetään alkuperäisestä pituudesta l_0 pituuteen l , syntyy siihen venymä Δl . Arvo on suoraan verrannollinen voimaan F . Suhteellinen venymä $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$. Venymä on positiivinen, jos sauva pitenee, ja negatiivinen, jos sauva lyhenee. (Halme)



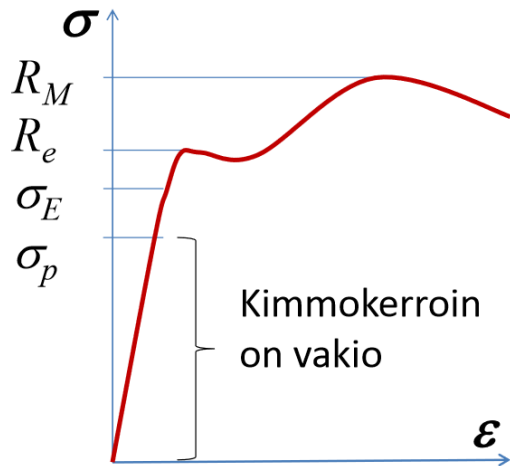
Kuva 7. Suhteellinen venymä (Halme)

3.2.3 Jännityksen ja venymän välinen yhteys

Jännityksen ja venymän välinen yhteys on tärkeimpiä lujuusopin ominaisuuksia. Jännitysvenymä käyrät eli $\sigma\varepsilon$ -käyrät poikkeavat eri materiaaleilla, mutta niistä voidaan selvittää materiaalin ominaisuudet. Käyrään voidaan katsoa seuraavassa esitetyt rajat. Suhteellisuusraja, josta käytetään lyhennettä σ_p , johon asti kimmokerroin E on vakio. Kimmoraja σ_E , johon asti venymä on täysin palautuva. Myötöraja R_e , jonka jälkeen materiaali ei palaudu entiselleen. Murtoraja R_M , jolloin materiaali murtuu ja hajoaa

(kuva 8). (Outinen Hannu, 2004)

Mikäli materiaalilla ei ole selkeää myötörajaa R_e käytetään myötörajana arvoa $\sigma_{0,2}$, jolloin kappaleen suhteellinen venymä ε on yli 0,2 %.



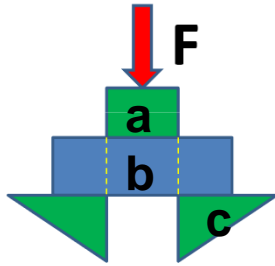
Kuva 8. $\sigma\varepsilon$ -käyrä (Halme)

3.2.4 Varmuusluku

Lujuuslaskennassa joudutaan aina yksikertaistamaan rakenteita laskuja varten, joten laskennassa esiintyy epävarmuustekijöitä. Koska rakenteet ovat yksinkertaistettu lujuuslaskennassa, niitä ei voida kuormittaa myötörajaan saakka. Tämän takia tarvitaan varmuuslukua rajoittamaan mitoittavaa jännitystä. Varmuusluku n on kriittisen jännityksen (esim. myötörajan R_e) suhde sallittuun jännitykseen $\sigma_{sall.}$.

3.2.5 Leikkausjännitys

Leikkauspinnassa vaikuttaa jännitysjakautuma, josta voidaan johtaa leikkausvoima Q . Pinnan suuntaista jännitystä kutsutaan leikkausjännitykseksi ja sitä merkitään symbolilla τ . Leikkausjännitys lasketaan kaavasta $\tau = \frac{F}{A}$, jossa A on poikkileikkauksen pinta-ala. Tulokseksi saadaan keskimääräinen leikkausjännitys, sillä todellisuudessa jännitys ei jakautu pintaan tasaisesti. (Outinen Hannu, 2004)

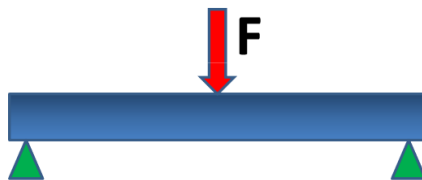


Kuva 9. Puhdas leikkaus kohdistuu sinisessä sauvassa (osa b) oleviin keltaisiin katkoviivoihin, kun osaa a painetaan kohti osaa c. (Halme)

3.2.6 Taivutus

Taivutusmomentti M_t on poikkileikkaukseen syntyvä normaali-jännityskentän momentti poikkileikkauspinnan pintakeskiön kautta kulkevan Z-akselin suhteen. Puhdaassa taivutuksessa palkkia rasittaa ainoastaan vakiosuuruinen taivutusmomentti.

Kuormitus saa palkin yläosan säikeet puristua, ja alaosa venymään. Jossakin on kohta, jossa säikeiden pituus ei muutu. Tätä kutsutaan palkin neutraalitasoksi. Poikkipintatason z-akselia kutsutaan poikkipinnan neutraaliakseliksi. Tästä päästään puhtaan taivutuksen yhtälöön $M_t = Fl$. (Outinen Hannu, 2004)



Kuva 10. Taivutuksessa kappale on tuettu (nuolet) ja siihen kohdistetaan voima F (Halme)

3.3 Von Misesin lujuushypoteesi

Lujuushypoteesi on teoria jonka avulla ennustetaan kestäkö materiaali tietyn jännitystilän vauriotumatta. Yksinkertaisissa kuormitustapauksissa materiaalivaurio voidaan yhdistää saatuihin mittaustuloksiin, jolloin saadaan määritettyä tarkasti materiaalin varmuusluku kyseisen vaurion suhteen.

Yleisen moniakselisen jännitystilän tapauksissa tämä ei ole mahdollista sen takia, koska jännitystiloja on olemassa rajattomasti. Lujuushypoteeseilla todellisesta jänni-

tys- (tai venymä)vektorista muodostetaan skalaari vertailujännitys, jota verrataan vetokokeen tulokseen. Jos vertailujännitys ylittää kyseiselle materiaalille annetut jännitys arvot, pettämisen oletetaan tapahtuvan.

Von Misesin teoria on yleisesti käytetty tapa, jolla voidaan melko hyvin laskea materiaalin kestävyys. Teoria perustuu siihen, että kun kimmoisaa materiaalia kuormitetaan, varastoituu siihen energiaa kimmoenergiana. Teoria sopii hyvin sitkeiden materiaalien, jossa veto- ja puristusmurtolujuudet ovat lähes yhtä suuria, myötöhypoteesiksi.

Von Misesin yhdistetty jännitys voidaan laskea kaavalla, jonka tulosta voidaan verrata mitoituksessa käytettävään sallittuun jännitykseen. Kaavassa käytetään seuraavia arvoja: σ_x = x-akselin suuntainen jännitys, σ_y = y-akselin suuntainen jännitys, σ_z = z-akselin suuntainen jännitys, τ_{xy} = xy-pinnan suuntainen leikkausjännitys, τ_{yz} = yz-pinnan suuntainen leikkausjännitys ja τ_{xz} = xz-pinnan suuntainen leikkausjännitys. Kaava on seuraavanlainen:

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (1)$$

(Hakala, 1986)

4 LUJUUSOPIN ELEMENTTIMENETELMÄN PERUSTEET

4.1 Historia ja tausta

Monimutkaisimmissa rakenteissa lujuuslaskelmia ei ole mahdollista laskea tavanomaisten matemaattisten funktioiden avulla, vaan joudutaan tyytymään likimääräiseen ratkaisuun. Parhaaksi numeeriseksi laskentamenetelmäksi on osoittautunut elementtimenetelmä Finite Element Method (FEM). Elementtimenetelmää alettiin käyttämään Yhdysvalloissa 1950-luvulla lentokoneteollisuudessa, mistä se levisi kone- ja rakennustekniikan alueille. (Lähtenmäki, 2010)

Elementtimenetelmän suosio perustuu tietokoneisiin, joiden kasvanut laskentateho on mahdollistanut suurten laskumäärien käsittelyn kohtalaisessa ajassa. Menetelmä kehittyi paljon 1960- ja 70-luvuilla, jolloin julkistettiin ensimmäiset lineaarisen statiikan ja

dynamiikan ohjelmistot. 1980-luvun lopulta lähtien on ohjelmistoja käyttäviä tavallisissa pöytäkoneissa niiden laskentatehon kehittyessä tarpeeksi hyviksi. Elementtimenetelmä on havaittu myös soveltuvan muihin teknillisiin laskentoihin mm. virtausopin, lämmönsiirron ja maamekaanikan laskemiseen. (Lähtenmäki, 2010)

4.2 Perusteet

Lujuusopin elementtimenetelmän perusyhtälöt voidaan johtaa kaikille rakennetyypeille lähtemällä liikkeelle lujuusopin perussuureita hallitsevista osittaisdifferentiaaliyhtälöistä tai näiden kanssa ekvivalenteista työ- ja energiaperiaatteista. Perusyhtälöt muodostetaan elementtien alueissa toteutettavan interpoloinnin avulla ja niistä saadaan tarkasteltavalle tehtävälle likiratkaisu.

Kolmiulotteisille solidirakenteille ja pintarakenteille (levyt, laatat ja kuoret) interpolointiin perustuva elementtimenetelmä on ainoa mahdollinen. Ristikko- ja kehärakenteille on mahdollista käyttää myös yksinkertaisempaa suoraa elementtimenetelmää, jolloin perusyhtälöt muodostetaan sauva- ja palkkiteoriaa käyttäen. Koska interpolointia ei suorassa elementtimenetelmässä käytetä, johtaa se sovellettavan teorian puitteissa tarkkaan ratkaisuun. (Lähtenmäki, 2010)

Lujuusopin yhtälöiden analyttinen ratkaiseminen onnistuu vain yksinkertaisen geometrian, kuormituksen ja tuennan omaavissa perustapauksissa. Elementtimenetelmässä geometrisesti mutkikas kappale jaetaan osiin, joiden geometria on tarpeeksi yksinkertainen. Näitä osia sanotaan elementeiksi. Kolmiulotteisen kappaleen elementteinä käytetään neli-, viisi-, tai kuusitahokkaita. Pintarakenteissa kappaleissa käytetään neli- tai kolmisivuisia tasoelementtejä ja Viivarakenteissa suoria janaelementtejä. (Lähtenmäki, 2010)

Elementtien koko voi vaihdella paljon riippuen tarkasteltavasta ongelmasta. Kappale voidaan jakaa samanaikaisesti erikokoisiin ja muotoisiin elementteihin sekä eri geometria ja materiaaliominaisuudet täyttäviin elementteihin. Vierekkäiset elementit yhdistetään toisiinsa yhteisillä pisteillä, joita sanotaan solmuiksi. Tätä elementtijoukkoa sanotaan elementtiverkoksi. Verkko kuvaa todellista kappaletta vain likimääräisesti, mikä voi aiheuttaa laskentavirheitä. Tämän takia käytettävien elementtien pitäisi olla mahdollisimman pieniä ja kaarevareunaisia, jotta vältettäisiin suuret laskentavirheet. (Lähtenmäki, 2010)

4.3 FEM-analyysi

Kaupallisissa FEM-laskentaohjelmissa on lukuisia mahdollisuuksia valita käytettävä analyysimalli ja elementtityyppi. Näiden valintaan on kiinnitettävä tarpeeksi huomiota jo laskun aloitusvaiheessa, koska riittävän tarkka tuloksia antava laskentamalli edellyttää soveltuvien sopivien elementtien, oikeaa verkon tiheyttä rakenteen eri osissa ja säännöllisen geometrian sisältävien elementtien käyttöä. (Lähtenmäki, 2010)

FEM -analyysi voidaan jakaa keskiviiva- (1D), keskipinta- (2D) ja Solid-malleihin (3D). 1D-malleja käytetään sauva- ja palkkirakenteille, 2D-malleja käytetään levy-, laatta- ja kuorirakenteille ja 3D-malleja käytetään kolmiulotteisille malleille, joiden geometria ei salli yksinkertaisempaa tarkastelua. (Lähtenmäki, 2010)

Laskentaohjelmissa voi olla sata erilaista elementtityyppiä, joista noin 20 on sellaista, jotka ovat tavallisessa käytössä. Samassa laskennassa voidaan käyttää yleensä rajoituksetta erilaisia elementtityyppejä, joka mahdollistaa mutkikkaiden yhdistettyjen rakenteiden laskemisen. Elementit on yleisesti jaettu seuraaviin ryhmiin: sauvaelementit, palkkielementit, 2D-solidielementit, laattaelementit, kuorielementit, 3D-solidielementit ja erikoiselementit. (Lähtenmäki, 2010)

Periaatteessa olisi helpointa tehdä kaikki lujuusanalyysit käyttäen valmiita tarkkoja kappaleiden 3D-malleja. Yleensä kuitenkin tarkastelut tarkoille 3d malleille muodostuvat liian raskaiksi laskettaviksi pöytäkoneille. Monesti lujuuslaskenta on nopeampaa ja riittävän tarkkaa tehtäväksi 1D- ja 2D-malleilla, jolloin tarpeeksi yksinkertaistettu rakenne antaa riittävän tarkan vastauksen. (Lähtenmäki, 2010)

FEM-ohjelmistoihin voidaan tuoda suoraan 3D-malleja tai FEM-ohjelmisto on osana 3D-suunnitteluohjelmaa, jolloin suurien ja monimutkaisten kappaleiden laskenta helpottuu. Tässä on kuitenkin vaarana se, että mallista tehtävä verkotus ei täytä tehokkaan verkotuksen vaatimuksia tai verkotus on liian tiheä epäolennaisissa kohdissa (esim. ruuvireiät). Tämän takia kappaleet täytyisi muokata ja yksinkertaistaa laskentaan sopiviksi. (Lähtenmäki, 2010)

Nykyaikaisissa ohjelmissa on mahdollisuus tehdä kappaleille staattisia tai epälineaarisia tarkasteluja. Staattisessa tarkastelussa kappaleen tukipinnat pysyvät paikallaan ja vaikuttavat voimat ovat aina samat, kun taas epälineaarisissa tarkastelussa tukipinnat

ja voimat voivat vaihdella tarkastelun aikana. (Lähtenmäki, 2010)

Nykyaikaiset ohjelmat ovat tehneet FEM-laskennasta helppoa, jopa liiankin helppoa. Ohjelmissa on vaarana, että tehdään tarkasteluja tuntematta tuloksia ja käytettyjä laskentaehdoja. Analyysin ehdoista täytyy tuntea käytettävä elementtityyppi, verkotuksen tiheys ja eteneminen rakenteessa, todelliset kuormitukset ja niiden suunta sekä todelliset tukipinnat. (Lähtenmäki, 2010)

FEM-laskentaohjelma antaa suuren määrän erilaisia tuloksia, jotka voidaan nykyään näyttää suoraan kappaleen pinnalla. 3D-tarkastelussa yleensä tuloksena käytetään yhdistettyä Von Misesin jännitystä (MPa/mm^2), joka ottaa huomioon kaikki kappaleen sisäiset jännityskomponentit ja laskee ne yhteen, sekä pintojen suuntaisia leikkausjännityksiä. (Lähtenmäki, 2010)

4.4 Materiaali

Gripperin rakenteissa oli käytetty S-355-luokan terästä ja heloituksessa S-255-luokan terästä. Tämän tutkimuksen tärkein hypoteesi oli, kestääkö rakenne alumiinisena, joten rakenne päätettiin laskea EN-AW 5083 -merialumiinin kanssa. Merialumiini EN-AW 5083 on tarkoitettu käytettäväksi vaikeissa olosuhteissa mm. merellä, koska se kestää hyvin hapettumista ja erilaisia kemikaaleja. Heloituksen tarkastelu tehtiin analyysissa edelleen S-255-luokan ruostumattoman teräksen kanssa, koska heloituksen osuus kokonaispainoista oli hyvin pieni.

5083 -alumiinin tiheys on n. kolmas osa S355-luokan teräksestä, mutta myötöraja $\sigma_{0,2}$ on vain n. 80 % S355-teräksestä. Runkorakenteessa esiintyy ajoittain paksuja kohtia, joten mitoituksissa käytetään 0/H111 alumiinin arvoja. (ks. Taulukko 2). Laskelmissa ei käytetä varmuuslukua, koska myöhemmistä laskelmista nähdään, että kriittiset kuormitukset ovat hyvin pienillä yksittäisillä alueilla. Varmuusluvun käyttö johtaisi liian jäykkään rakenteeseen tässä tapauksessa.

Gripperin prototyypin analyysissa on käytetty S355-luokan terästä, jonka tiheys on 7850 kg/m^3 .

Tämän raportin laskelmissa on käytetty EN-AW 5083-alumiinia, jolle on seuraavat raja-arvot määritelty:

Taulukko 2. EN-AW 5083 alumiinin ominaisuudet (Eurokoodi 9, Alumiinirakenteiden suunnittelu osa1-1)

Myötöraja 0,2% normaalilevyllä:	MPa	280
Myötöraja 0,2% muutosvyöhykkeellä*:	MPa.	115
Tiheys	ρ (kg/m ³)	2660
Kimmokerroin	E (MPa)	70000
Liukukerroin	G (MPa)	27000
Poissoninluku	ν	0,3

*Muutosvyöhykkeellä tarkoitetaan aluetta, joka on alle 200 mm kappaleen reunasta tai eri kappaleiden liitoskohdasta.

Taulukko 3. Alumiinin ominaisuudet (Eurokoodi 9, Alumiinirakenteiden suunnittelu osa1-1)

	Toimitus-tila	Paksuus	Myötöraja 0,2%	Vetomurtolujuus	Muutosvyöhyke		Muutosvyöhykkeen tekijä	
		t	f_o	f_u	$f_{o.haz}$	$f_{u.haz}$	$\rho_{o.haz}$	$\rho_{u.haz}$
		mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
Ohutlevy, nauha ja levy	O/H111	≤50	125	275	125	275	1,00	1,00
		50<t≤80	115	270	115	270	1,00	1,00
	H12	≤40	250	305	155	275	0,62	0,90
	H22/H32	≤40	215	305	155	275	0,72	0,90
	H14	≤25	280	340	155	275	0,55	0,81
	H24/H34	≤25	250	340	155	275	0,62	0,81

5 TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU

1970-luvulta lähtien tietokoneella tehty suunnittelutyö on syrjäyttänyt perinteisen paperille tehdyn suunnittelun. Käytetyin suunnitteluohjelma on AutoCad, jolla suunnittelua tehdään lähinnä kaksiulotteisena. Kolmiulotteisten (3D) suunnitteluohjelmien käyttö alkaa olla lähes yhtä yleistä. Käytetyimpiä niistä ovat Pro Engineer, Catia ja SolidWorks, jotka ovat myös parametrisia suunnitteluohjelmia.

Tänä päivänä tuotteet voidaan suunnitella aivan alusta tuotantoon asti tietokoneella. Enää ei riitä suunnitella pelkästään kappaleen ulkonäköä ja työpiirustuksia vaan nyky-päivänä suunnittelu pyritään tekemään Design For Manufacturing and Assembly-metodilla (DFMA), joka tarkoittaa sitä, että tuotteen osat suunnitellaan alusta lähtien mahdollisimman sekä yksinkertaiseksi ja helpoksi valmistaa että toimivaksi kokonaisuudeksi.

Suunnittelutyöhön osallistuvat alusta lähtien tuotteen kaikki komponenttivalmistajat ja tuotannon suunnittelijat. Isomman kokonaisuuden suunnittelua voidaan tehdä samanaikaisesti eri kohteissa ja näin antaa myös välitöntä palautetta ja muuttaa kokonaisuutta reaaliaikaisesti.

Ennen suunnittelijat tekivät tietyn osan suunnittelun itsekseen ja tämän jälkeen antoivat työn eteenpäin seuraavalle suunnittelijalle, jolloin myöhempien muutosten tekeminen oli hyvin vaikeaa ja hidasta. Tuotannossa sitten eri paikoissa suunnitellut kappaleet koitettiin saada toimimaan keskenään. DFMA-metodi tekee valmiista tuotteista siksi paljon laadukkaampia ja halvempia. (Hietikko, 2011)

5.1 Parametrinen piirremallinnus

Ranskalainen yritys Dassault systemes on 1980-luvun alusta lähtien kehittänyt kolmiulotteista suunnitteluohjelmistoa. He julkaisivatkin v. 1982 ensimmäisen version CATIA-ohjelmasta (Computer Aid Three-Dimensional Interactive Application). Samalta toimistolta julkaistiin vuonna 1995 SolidWorks-ohjelma, joka sai alusta lähtien paljon kiitosta selkeän käyttöliittymän ja helppokäyttöisyyden takia.

Parametrinen piirremallinnus tarkoittaa tietokoneohjelmaa, jossa tuotteet suunnitellaan valmiiksi kolmiulotteisena. Tällöin nähdään hyvin aikaisessa vaiheessa monet asiat

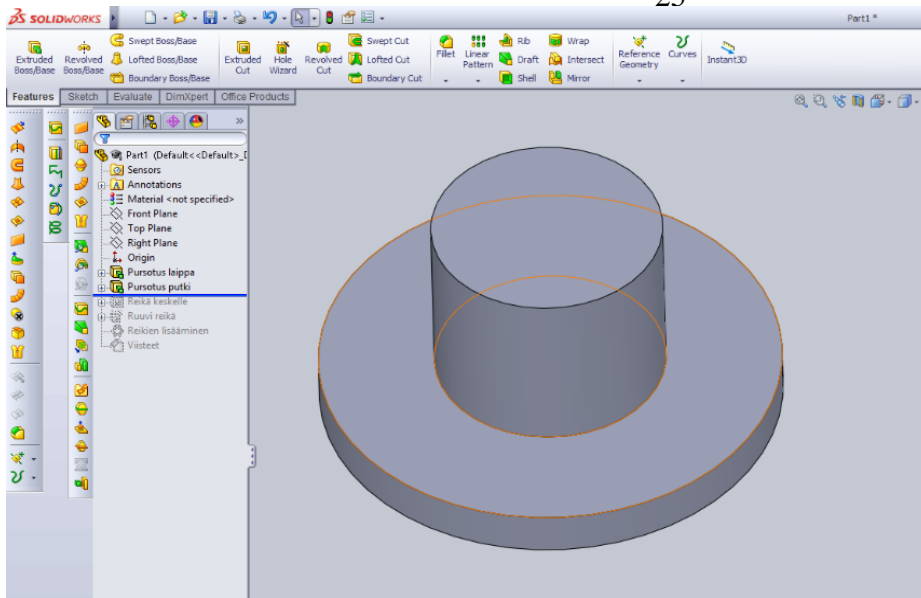
mm. kappaleen eri osien yhteensopivuus ja toimivuus. 90 % tämän päivän mekaniikkasuunnittelusta tehdään parametrisella piirremallinnuksella.

Parametrisuudella tarkoitetaan ohjelmissa sitä, että tuotteet mittoja ja muotoja voidaan muuttaa missä vaiheessa mallinnusta tahansa. Tämä helpottaa suunnittelua, koska suunnitelluille osille voidaan antaa tarkat mitat myöhemmässä vaiheessa suunnittelua. Parametrisuudessa voidaan myös tehdä riippuvuuksia eri mittojen välillä.

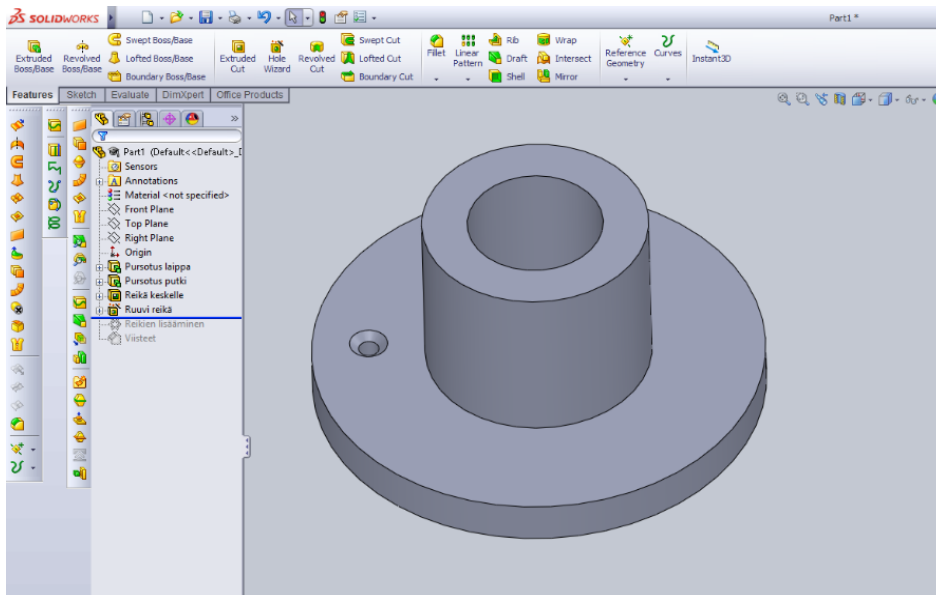
Piirremallinnus tarkoittaa sitä että osa rakennetaan piirteistä. Eli aluksi tehdään isot karkeat muodot, joita sitten tarkennetaan askel kerrallaan myöhemmin. Käytetyimmissä ohjelmissa on myös piirrepuu johon tulee näkyviin tuotteen kaikki piirteet. Piirre puusta voidaan sitten jälkikäteen muokata tuotteen muotoa ja mittoja.

Piirrepuu on tehokas kommunikointiväline eri suunnittelun osapuolien välillä. Sen avulla voidaan hyvin näyttää suunnittelun etenemistä ja osien lähtökohtia ja faktoja. Piirrepuun avulla suunnitellessa täytyy ottaa huomioon se, että ei tehdä alussa sellaisia tarkkoja piirteitä, jotka estävät myöhemmin tehtäviä suuria muutoksia kappaleissa, jotta kaikki pyöristykset ja viisteet olisi hyvä jättää aivan viimeiseksi. (Hietikko, 2011)

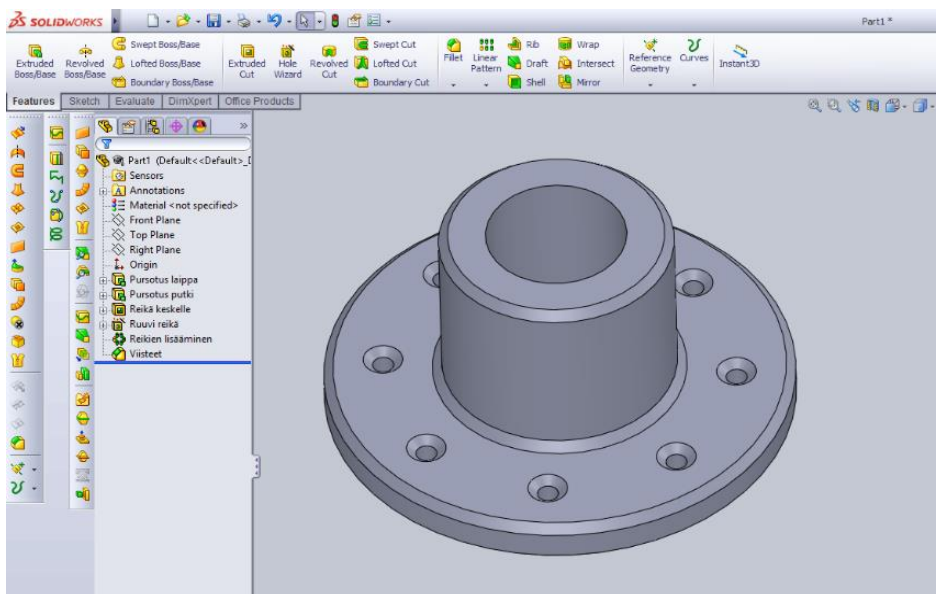
Kuvissa 11-13 on esitetty piirremallinnuksen periaate. Kuvassa 11 näytetään, kuinka kappaleelle on suunniteltu perus runko eli laippa ja putki. Kuvassa 12 laippaan on tehty ruuvien reiät ja kuvassa 13 on tehty kulmien pyöristykset. Kuvien vasemmassa laidassa näkyvät piirrepuut, joita voi sitten jälkikäteen muokata.



Kuva 11. Laippa ja runko.



Kuva 12. Ruuvien reiät



Kuva 13. Kulmien pyöristys

5.2 SolidWorks

SolidWorks valikoitui tässä tutkimuksessa käytettäväksi ohjelmaksi sen monipuolisuuden takia, koska se sisältää kattavan 3D-suunnittelu osion ja tähän tarkasteluun kelpaavan FEM-laskenta osion. Ohjelman valintaa helpotti myös se että prototyypin suunnittelu ja lujuustarkastelu oli tehty SolidWorksilla.

SolidWorks on parametrinen 3D-mekaniikkasuunnitteluohjelmisto joka sisältää tilavuus-, ohutlevy- ja pintamallinnustyökalut. Ohjelmistoa käytetään hyvin erilaisten koneiden, laitteiden ja mekaniikoiden suunnittelussa. SolidWorks 3D -ohjelmisto on kehitetty mekaniikkasuunnittelun ja muotoilun tarpeisiin. (Hietikko, 2011)

Simulation on SolidWorksiin erillinen lujuuslaskentaohjelma. Ohjelma on täysin integroitu muun ohjelmiston kanssa, jolloin kaikki piirustukset yms. on suoraan käytävissä ohjelmassa. Ohjelma on tehty erittäin helppokäyttöiseksi FEM-laskentaohjelmaksi. Ohjelman tulokset ovat hyvin hyödyntämiskelpoisia yleisessä tarkastelussa.

Erittäin kriittisessä lujuustarkastelussa ja rakenteen optimoinnissa vastaan tulee vaihtoehtoiset tukipintojen, voimien ja elementtien määrä. Simulation lisäohjelmistoa voidaan käyttää hyvin päivittäisessä tuotesuunnittelussa, mutta syvällisempi lujuusanalyysi olisi hyvä antaa asiantuntijan tehdä pelkästään FEM-laskentaan suunnitelluilla ohjelmistoilla. (Hietikko, 2011)

SolidWorksia käytettiin työssä Gripperin rakenteen suunnitteluun. Ohjelman avulla rakenne suunniteltiin uudelleen vanhojen piirustusten ja mallien mukaan. Rakenteen ollessa valmis sitä alettiin optimoimaan tekemällä sille FEM-analyysija Simulation-lisäohjelman avulla.

5.3 Mathcad

Mathcad laskentaohjelman avulla laskettiin VTT:n antamista arvoista Gripperin rakenteeseen vaikuttavat voimat. Ohjelma on laskentaan tarkoitettu tietokoneohjelmisto. Sen ensimmäinen DOS-versio ilmestyi 1986. Mathcad on tarkoitettu lähinnä numeerisiin ratkaisuihin, vaikka siinä on myös symbolisen laskennan ominaisuuksia.

Mathcadia pidetään ensimmäisenä ohjelmistona, joka käyttää myös hyväkseen ja tarkistaa laskennassa käytettävät yksiköt mm. Kansainvälinen yksikköjärjestelmän (SI) yksiköt. Mathcadin käyttö perustuu laskenta-arkkeihin, joissa yhtälöt ja lausekkeet esitetään samalla tavalla kuin paperillakin - toisin kuin yleensä matematiikkaa tietokoneella ratkaistaessa.

Mathcadin avulla yhdistetään laskenta-arkille eri elementtejä, kuten matemaattisia lausekkeita, tekstiä ja selventäviä kuvia. Näin tuloksena oleva dokumentti on selkeä myös niille, joilla ei ole tätä ohjelmaa käytössään. Matemaattiset lausekkeet ja yhtälöt ovat "eläviä" eli alkuarvoja ja kaavoja muutattaessa, tulokset muuttuvat vastaavasti. Näin voidaan nopeasti kokeilla eri tekijöiden vaikutusta tuloksiin ja sen kuvaajiin. (Wikipedia, 2014)

6 FEM-ANALYYSI

Gripperin FEM-analyysissä on noudatettu normaalin lujuusanalyysin järjestystä. Ensimmäisenä selvitettiin lähtötilanne ja se, mitä ollaan laskemassa. Tämän jälkeen selvitetään kappaleeseen vaikuttavat kuormitukset ja tehdään niistä laskentaa varten idealisoidut kuormitukset. Lopuksi määritetään kappaleiden laskentatavat seuraavassa järjestyksessä: 1. Mitkä kappaleet lasketaan yhdessä ja mitkä erikseen. 2. Tehdään kappaleille paras mahdollinen reunaehdot ja verkotus 3. Lopuksi määritetään laskettavat projektiot ja jännitykset, joista halutaan tuloksen näkyviin.

Kappaleiden reunaehdot ovat laskennassa hyvin keskeisessä osassa. Reunaehdot on saatava hyvin todenmukaisiksi, eli miten kappale on kiinni avaruudessa ja miten se on kiinni muissa kappaleissa. Reunaehtoien antamisen jälkeen aletaan optimoimaan verkotusta siten, että se antaa todenmukaiset tulokset. Laskujen keventämiseksi verkotus pyritään tehdä tiheäksi ennalta määrätyissä kriittisissä kohdissa ja muualla verkotus voi olla väljempää. Kun reunaehtoien ja verkotuksen toiminta on varmistettu, voidaan tehdä kappaleelle laskenta.

Tuloksia voidaan analysoida monella tavalla. Nykyajan ohjelmista saadaan ulos monenlaisia arvoja. Näiden oikeanlainen hyödyntäminen on tärkeää. Täytyy osata ottaa rakenteesta ulos oikeat ja oikeansuuntaiset jännitykset. Von Misesin jännitykset ovat hyvin käyttökelpoisia yleisessä tarkastelussa, mutta ne vaativat rinnalle muita tuloksia. Erittäin kriittisissä ja optimoiduissa rakenteissa olisi hyvä vielä tietokoneen tekeminen

laskujen jälkeen tehdä tarkistuskalkulaatio käsin.

Seuraavissa kappaleissa käydään tarkemmin läpi lujuusanalyysin eri vaiheet. Tulokset eivät vastaa todellisuutta, koska tässä osassa laskuissa käytetyt arvot ovat vain esimerkkiarvoja.

6.1 Lähtötilanne

Gripperin rakenne on suunniteltu tarttumaan tuulivoimalaan, joissa on kiinnityspotket täyttävät seuraavat ehdot:

- Kiinnityspotkien väli: 1700 -1900 mm
- Kiinnityspotkan halkaisija 360 mm

Tässä raportissa olevissa tarkasteluissa aluksen nopeus on 1,8 solmua ja uppouma 37 000 kg. Mittausten pohjana on käytetty arvoja, joihin alus joutuu n. 2,5 m:n merkitsevässä aallonkorkeudessa ja 5,5 s:n aaltoperiodissa. Lujuus tarkastelut tehdään 1700 mm ja 1900 mm potpavälillä, jotta saadaan selville ääriasentojen kuormittavat jännitykset.

Törmäystarkastelussa alus törmää ensiksi toisella puolella kiinni toiseen kiinnityspotkeen, jonka ympärille kiinnitytään ensiksi. Tämän jälkeen aluksen koneen avulla työnnetään toinenkin puoli kiinni kiinnityspotkeen. Kun molemmat puoliskot ovat kiinni, aluksen keula lukitaan Gripperin avulla aallokon korkeimmalle kohdalle siten että se ei pääse liikkumaan mihinkään suuntaan.

Tässä tilanteessa aluksen keula ei ole välttämättä koko ajan kosketuksissa veteen, jolloin alukseen muodostuu z-suuntainen eli pystysuora voima. Tuuli ja meriveden virtaukset aiheuttavat alukselle sen suurimmat voimat eli x- ja y-suuntaiset voimat.

6.2 Kytkentään vaikuttavat voimat

Alun perin VTT on arvioinut kytkentään vaikuttavat voimat laboratorio-olosuhteissa. Näiden voimien pohjalta suunniteltiin Gripperin prototyyppiversio. Valmistuneeseen Gripperin prototyyppiversioon asennettiin venymäliuskat, jotka mittaavat kuormituksia todellisessa tartuntatilanteessa merellä. Näiden lukemien mukaan tulokset ovat n. 20 % VTT:n laboratoriossa tekemiä mittauksia pienemmät.

Tämän takia lujuusanalyysissä voitiin käyttää 20 % pienempiä voimia kun prototyypin suunnittelussa. Laskettuja voimia pienemmät voimat mahdollistivat rakenteen suunnittelun alumiinista, mikä oli hylätty materiaalina prototyypin suunnittelussa. (Immonen, 07/2012)

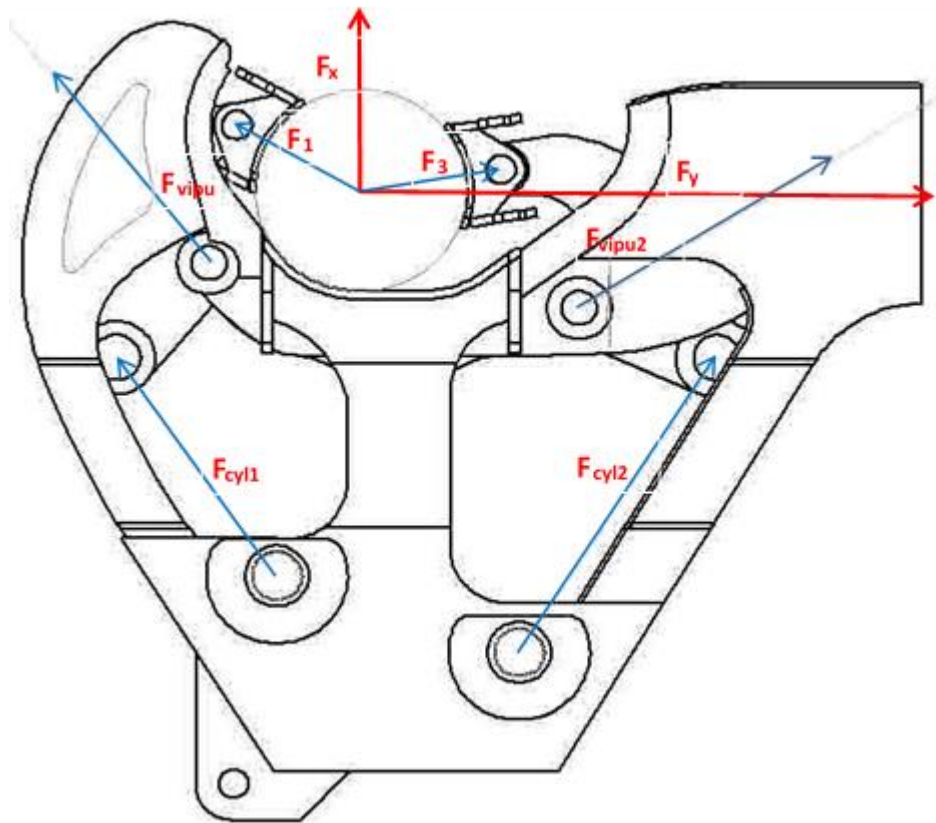
Alla olevassa taulukossa 1 ovat kuvitteelliset VTT:n ilmoittamat voimat ja niistä lasketut 20 % pienemmät todelliset voimat.

Taulukko 4. Kytkentään vaikuttavat voimat

	VTT:n mitaamat arvot (kN)	20 % pienemmät arvot (kN)
F_x	100	80
F_y	50	40
F_z	200	160
	(kNm)	(kNm)
M_z	20	16

F_x -voima pyrkii vetämään alusta irti kiinnityksestä. Tämä voima on ajateltu vaikuttavan kokonaisuudessaan yhdelle laitteen puoliskolle. F_y -voima jakaantuu puoliksi Port- ja STB-puolen tarraimille. Voima voi vaikuttaa molempiin suuntiin, joten laskennassa on otettu huomioon pahin tarkastelutilanne. M_z on momentti, jolla aluksen perä pyrkii kääntymään sivulle tartuntatilanteessa. Tämä momentti on otettu huomioon lisäämällä se F_x -voimaan. F_z on pystysuuntainen voima, joka painaa aluksen keulaa alaspäin ja se on tarkastelussa jaettu tasan Port- ja STB-puolen tarraimille. Tarkat laskelmat löytyvät Liitteestä 2.

Gripperin sisäiset voimat on laskettu ulkoisista voimista F_x ja F_y . Voimat F_1 ja F_3 on laskettu vektorilaskennan avulla voimista F_x ja F_y . Voimat F_{cy11} ja F_{cy12} ovat laskettu momenttilausesta hyödyntäen voimista F_1 ja F_3 . Voimat F_{vipu} ja F_{vipu2} ovat laskettu vektorilaskennalla voimista F_{cy11} ja F_{cy12} sekä voimista F_1 ja F_3 . Voimien suunta ja sijainti on esitetty kuvassa 14. Tarkemmat laskutoimitukset 1700 ja 1900 mm:n tartuntatilanteista on esitetty liitteessä 2. (Valtanen, 2010)



Kuva 14. Gripperin sisäisten voimien suunta, sijainti ja nimi.

Kuvissa ja mittauksissa käytetään vain Gripperin toista puoliskoa, koska rakenne on identtinen molemmiin puoliin. Raportissa olevat massa ovat Gripperin yhden puolikkaan massoja. Tällä saadaan tietokoneelle kevyemmät FEM-laskennat. Alla on listattu prototyypin viitteelliset perustiedot:

Taulukko 5. FEM-analyysissä käytettävät Gripperin arvot

Kokonaisleveys:	mm	3000
Kokonaispituus.	mm	1500
Rungon korkeus:	mm	500
Rungon kokonaiskorkeus:	mm	900
Rungon massa:	kg	500
Tarrainten massa:	kg	150
Massa yhteensä:	kg	650
Koko Gripperin massa:	kg	n.3000

(Insinööritoimisto x, 2012)

6.3 Lasketut analyysit

Gripperin lujuusanalyysin tarkasteluissa osat laskettiin erikseen, jotta vältettäisiin kapaleiden liikkuvien osien välisten kosketuspintojen aiheuttamat raskaat ja epätarkat laskelmat. Gripperin rungon, vipuvarsien ja tarrainten laskelmat ovat tehty kiinnitystilanteesta kahdella eri tolppavälillä 1700 mm ja 1900 mm. Lisäksi on laskettu vielä erikseen törmäystilanne.

1700 mm:n ja 1900 mm:n tolppavälin laskuissa runkorakenne on sama. Tästä johtuen kontaktit ja verkotus ovat yhtenäisiä. Ainoastaan voimien suuruus ja suunta vaihtelee laskentojen välillä. Tarkastelulla laskettiin tilanne, jossa alus on tarttunut Gripperin avulla tuulivoimalaan kiinni ja alukseen kohdistuvat oman massan, tuulen ja aallokon aiheuttamat rasitukset. Laskenta on tehty vain toiselle puolikkaalle, koska molempiin puolikkaisiin kohdistuu samat voimat.

Tässä osassa on havainnollistavat esimerkit runkorakenteesta 1700 mm:n tolppavälillä ja sisemmästä vipuvarresta 1900 mm:n tolppavälillä ja uloimmasta tarraimesta 1900 mm:n tolppavälillä. Loput tarkastelu tapaukset jätettiin käymättä tulosten samankaltaisuuden vuoksi. Näytettävät tapaukset ovat vain esimerkkejä, eivätkä ole välttämättä tarkastelutilanteista, jossa kuormitukset olivat suurimmat.

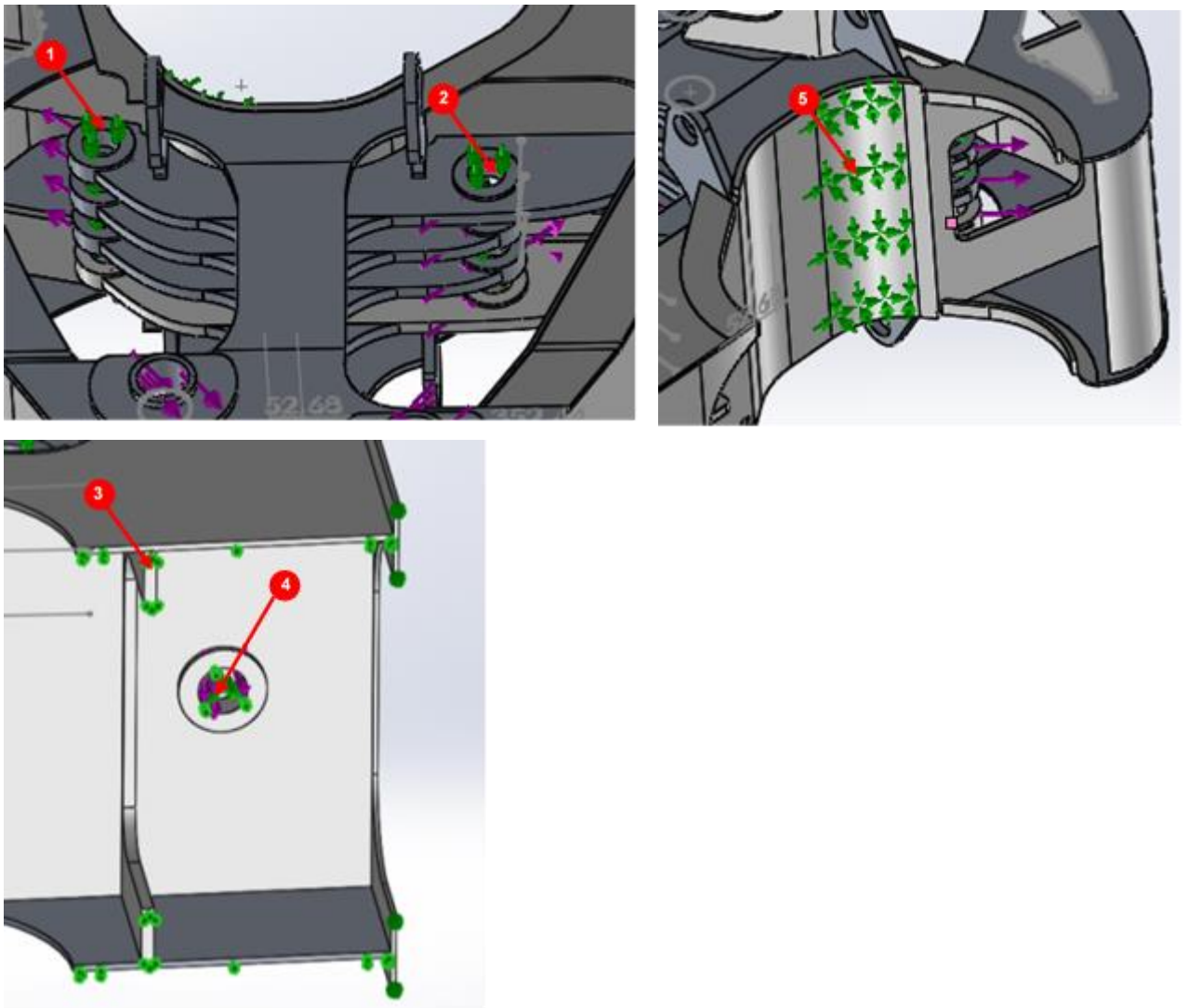
6.4 Voimat ja reunaehdot

Tässä on esitetty kappaleisiin kohdistuneet voimat ja niille annetut reunaehdot. Havainnollistavat kuvat ovat 1700 mm:n tolppavälillä tehdystä analyysistä. Alla olevissa kuvissa on näytetty, kuinka ehdot ovat syötetty Simulationissa vaikuttamaan kappaleisiin.

6.4.1 Runkorakenteen reunaehdot

Kappaleille täytyy antaa reunaehdot, jotka pitävät kappaleen paikallaan avaruudessa. Reunaehdot ovat esitetty kuvassa 15. Ehdot ovat seuraavat:

1. Sylinteriehto, jossa siirtyminen pystysuunnassa on estetty.
2. Sylinteriehto, jossa siirtyminen pystysuunnassa on estetty.
3. Symmetriaehto (Gripperin puolitus), virheillä nuolilla merkityillä pinnoilla.
4. Sylinteriehto, jossa kiertymistä ei ole estetty, mutta muut siirtymät ovat lukittu
5. Kiinteä reunaehto, jossa kaikki liike on estetty.



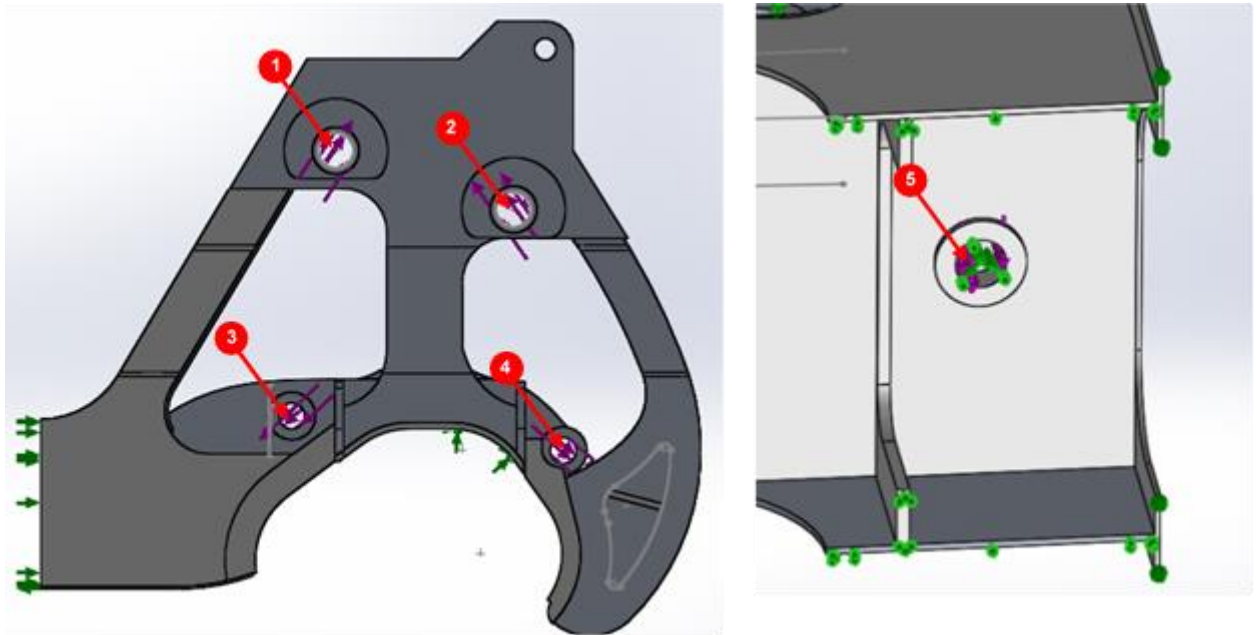
Kuva 15. Runkorakenteen reunaehdot 1700 mm:n tolppavälillä

6.4.2 Runkorakenteen voimat

1700 mm:n ja 1900 mm:n tolppaväleillä voimien suuruus vaihteli huomattavasti. 1900 mm:n tolppavälillä voimat olivat suuremmat kuin 1700 mm:n välillä. Uloimman tarraimen voima F_{vipu} oli vain noin 5 % suurempi, mutta sisemmän tarraimen voima F_{vipu2} oli n. 50 % suurempi. Alla olevassa kuvassa on esitetty ohjelmaan syötetyt runkorakenteeseen vaikuttavat voimat ja niiden suunnat

Kuvassa 16 on esitetty seuraavat voimat:

1. Sisemmän tarrainsylinterin aiheuttama voima F_{cyl2} .
2. Uloimman Tarrainsylinterin aiheuttama voima F_{cyl1} .
3. Sisemmän vipuvarren aiheuttama voima F_{vipu2}
4. Ulomman vipuvarren aiheuttama voima F_{vipu}
5. Alaspäin vaikuttava voima F_z .

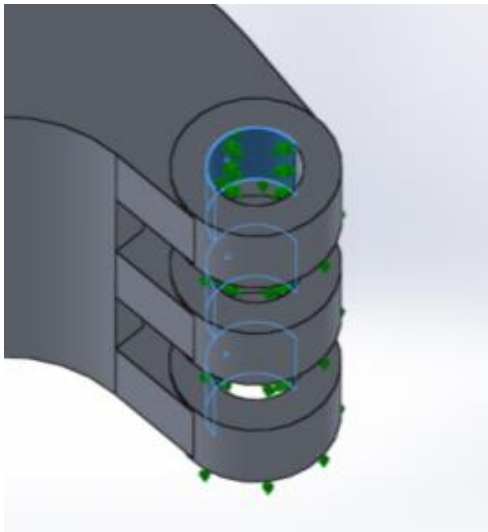


Kuva 16. Kappaleeseen kohdistuvat voimat 1700 mm:n tolppavälillä

6.4.3 Sisempi vipuvarren reunaehdot ja voimat

Kuormitus 1700 mm:n tolppavälillä oli vipuvarrelle ja 1900 mm:n tolppavälillä olivat hyvin saman suuruisia ja -suuntaisia, joten rakenteeseen kohdistuvat jännitykset ovat hyvin samalaisia. Tämän takia sisemmän vipuvarren laskelmat tehtiin vain suurimmalla arvolla eli 1900 mm:n tolppaväillä.

Vipuvarsien kiinnitystappien reikien sisäkehät (kuva 17) ovat jaettu kahteen osaan, jotta kuormitus olisi realistinen kehän eri osiin.

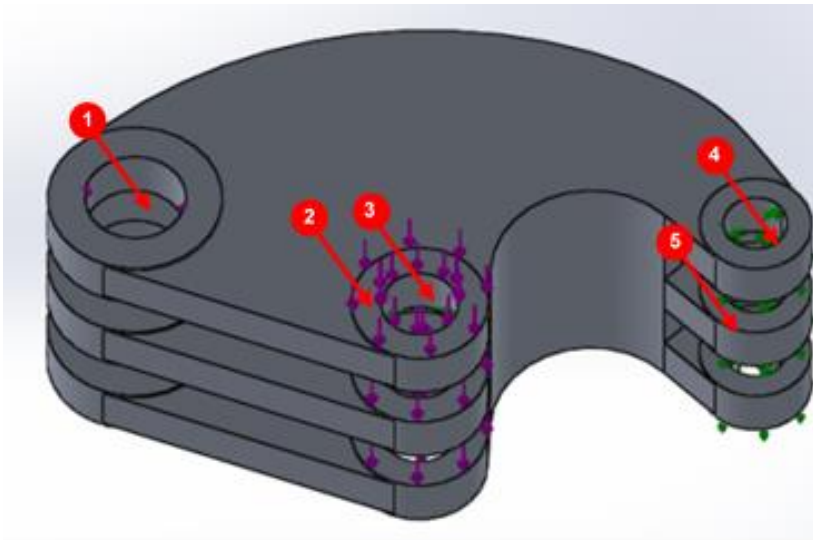


Kuva 17. Vipuvarsien sisäkehät

Sisempään vipuvarteen vaikuttavat seuraavat reunaehdot ja voimat:

1. Sisemmän tarrainsylinterin aiheuttama voima F_{cyl2}
2. Alaspäin painava voima F_z
3. Kiinteä reunaehto. Ehto on voimassa vain vaikutuspinnalla. (kuva 17)
4. Kiinteä reunaehto, joka estää kaikki siirtymät. Ehto on voimassa vain vaikutuspinnalla. (kuva 17)
5. Pintaehto, joka estää siirtymät pystysuunnassa.

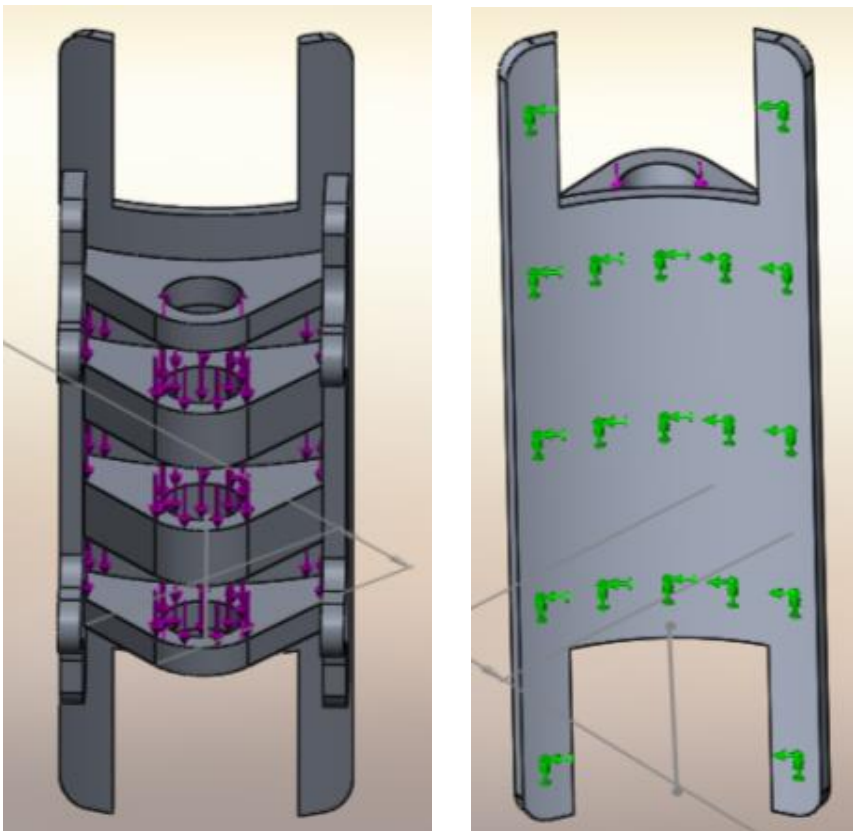
Voimien sijainti rakenteessa on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Sisemmän vipuvarren reunaehto ja voimat

6.4.4 Tarraimen voimat ja reunaehdot

Sisäpuolen ja ulkopuolen tarraimet ovat täsmälleen samanlaisia. Tarraimeen kohdistunut voima tulee kohtisuorassa kaikissa tilanteissa, joten tarkastelussa voidaan ottaa huomioon vain suurin vaikuttava voima. Tämä voima on 1900 mm:n tolppavälillä ulommalla tarraimella. Lisäksi tarrainta painaa alaspäin F_x -voima. Tarraimen sisäpinnalla on reunaehto (vihreät nuolet) joka estää siirtymät joka suuntaan.



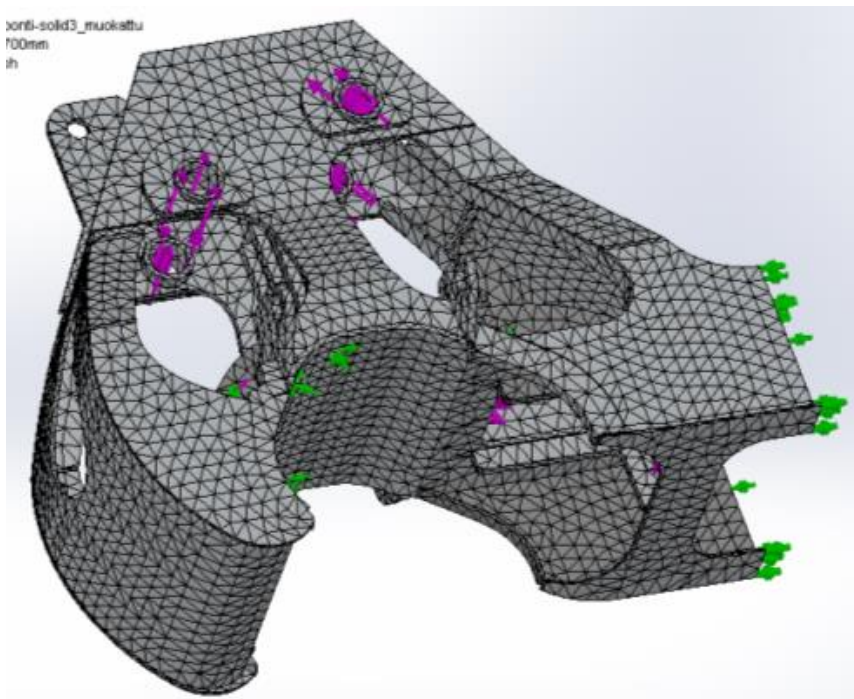
Kuva 19. Tarraimen voimat ja reunaehto

6.5 Verkotus

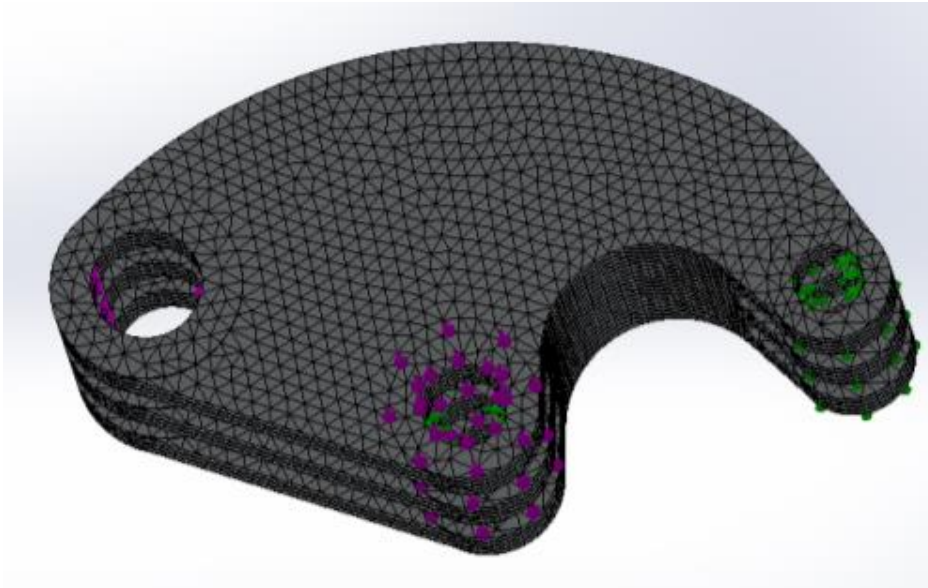
Verkotus on tärkeä osa laskentaa, koska laskenta perustuu verkotukseen. Verkotus muodostuu elementeistä, jotka ovat kiinni toisissaan solmujen avulla. Ensimmäisissä analyyseissä verkotus tuotti ongelmia, koska kappaleet olivat suunniteltu pintoina eikä tilavuuskappaleina.

Tämän takia verkotus ei jatkunut osasta toiseen, koska SolidWorksin ei voinut käsitellä vierekkäisiä pintoja yhtenäisenä kappaleena. Eri pinnoilla olevien elementtien väliin ei muodostunut solmuja. Tämä ongelma poistui tekemällä kaikki osat uudestaan Solid kappaleina ja yhdistämällä ne yhtäinseksi rakenteeksi. Alla olevissa kuvassa 20 ja 21 verkotus toimii kappaleiden välillä. Verkotus on joka puolella sama, koska se on voitu tehdä tiheimpänä mahdollisina.

Verkotus tehtiin runkorakenteeseen kolmioilla joiden sivun pituus oli 38 mm ja vipuvarteen kolmoilla, joiden sivun pituus oli 12,3 mm (kuva 20 ja 21). Näin runkorakenteeseen muodostui 31 515 eri elementtiä ja vipuvarteen 66 256 elementtiä.



Kuva 20. Runkorakenteen verkotus



Kuva 21. Sisemmän vipuvarren verkotus

7 TULOKSET

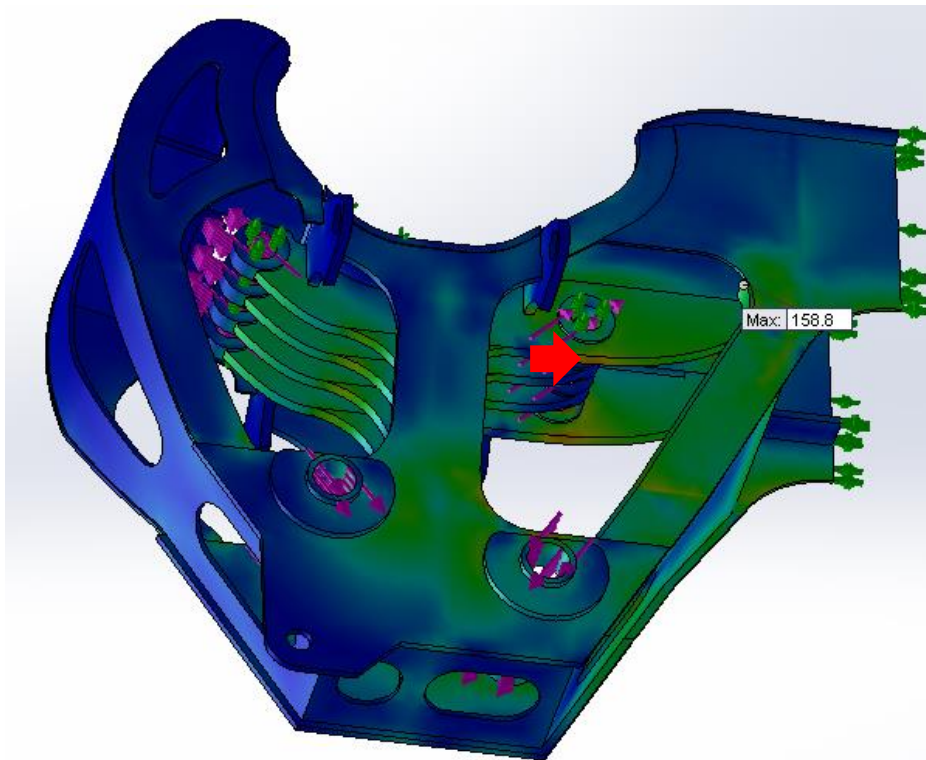
Analyysissa tarkasteltiin kaikista kappaleista kahdet erilaiset tulokset, Von Misesin yhdistetyt jännitykset ja x- ja y-akselin suuntaiset leikkausvoimat. Näihin tuloksiin tehtiin sellainen väri skaala että punaisen värin raja on Eurokoodin suurin suosittelema jännitys Al-5083 -alumiinin muutosvyöhykkeelle eli 115 MPa. Kuvat ovat otettu suoraan Simulation-ohjelmasta ja vastaavat todellisten arvojen mukaan tehtyä analyysia. Tarkempia tuloksia ei käydä läpi tässä opinnäytetyössä niiden luottamuksellisuuden vuoksi. Esitetyt tulokset eivät ole välttämättä kriittisimmistä tarkastelutilanteista. (Eurokoodi 9, Alumiinirakenteiden suunnittelu osa1-1)

Ensimmäisten tulosten perusteella jo kävi ilmi, että rakenne voidaan toteuttaa alumiinista. Jännityksiä oli hyvin vähän levyrakenteissa, joten sinne voitiin tehdä aukotuksia ja vähentää materiaalipaksuuksia. Jäykisteisiin piti pääsääntöisesti lisätä materiaalipaksuutta. Suurimmat rasitukset kohdistuvat niveltukilevyihin ja vipuvarsiin, mutta niissäkin suuret jännitykset ovat hyvin paikallisia.

7.1 Runkorakenteen Von Misesin yhdistetyt jännitykset

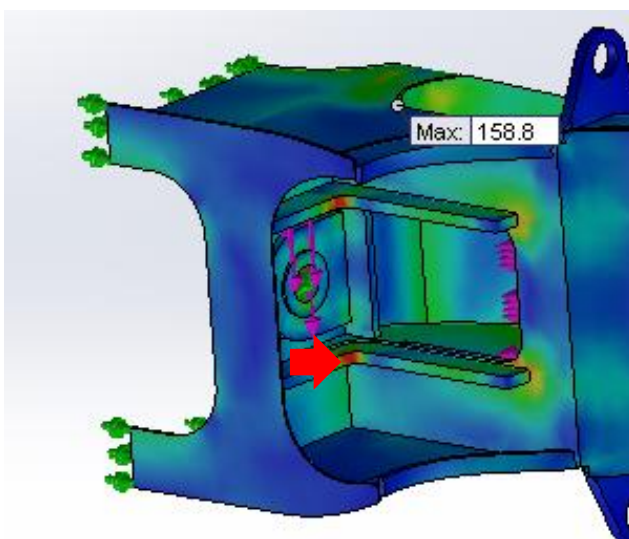
Jokaisesta kappaleesta yksittäiselle osalle tehtiin tarkastelu Von Misesin yhdistetystä jännityksestä. Päältä tehdystä tarkastelusta voidaan huomata että niveltukilevyn taka-reunassa on pieni punainen alue (nuoli kuva 22), mutta se ei ole muutosvyöhykkeellä.

Kuvassa 22 näkyvä maksimiarvo 158 MPa on hyvin pieni paikallinen piste, joka johtuu todennäköisesti vain verkotuksen ominaisuuksista.



Kuva 22. 1700 mm:n tolppavälin laskennan Von Misesin yhdistetyt jännitykset.

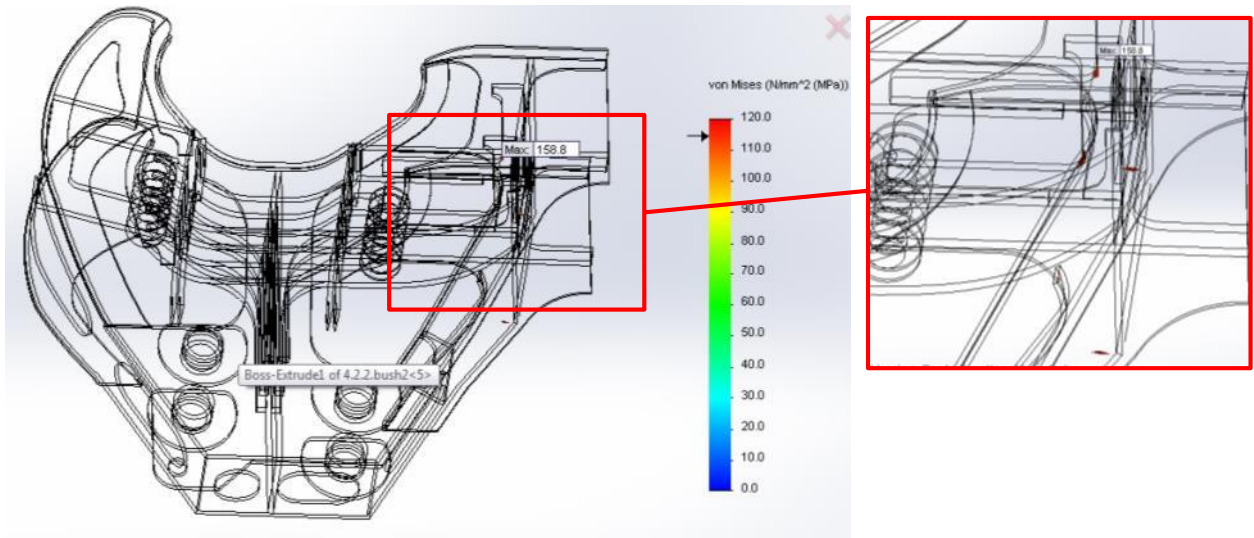
Edestäpäin tarkastelussa Gripperin sisemmässä reunassa (nuoli kuva 23) näkyy jännitystä kulmassa niveltukilevyissä. Kulman muotoa ei voida pyöristää Gripperin vipuvarresta johtuen, siksi jännitys nousee yli sallitun, mutta jännitys on hyvin paikallinen, eikä ole muutosvyöhykkeellä.



Kuva 23. 1700 mm:n tolppavälin Von Misesin yhdistetyt jännitykset edestä esitettynä.

Seuraavassa kuvassa 24 on esitetty kaikki yli sallitun olevat jännitykset punaisina alu-

eina. Kuvan avulla voidaan huomata, että rakenteessa ei ole yli sallitun meneviä jännityksiä.

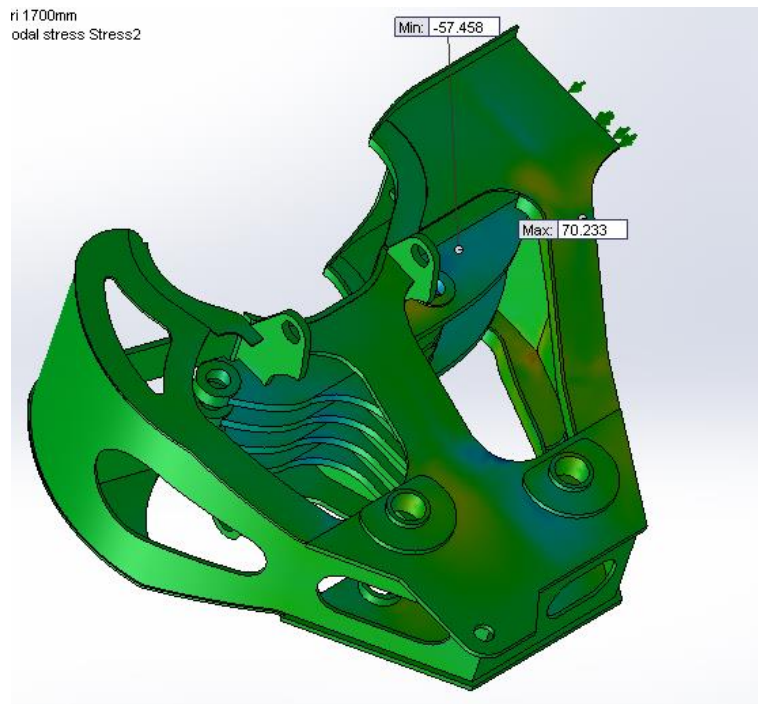


Kuva 24. 1700 mm:n tolppavälin jännitysten sijainnit rakenteessa

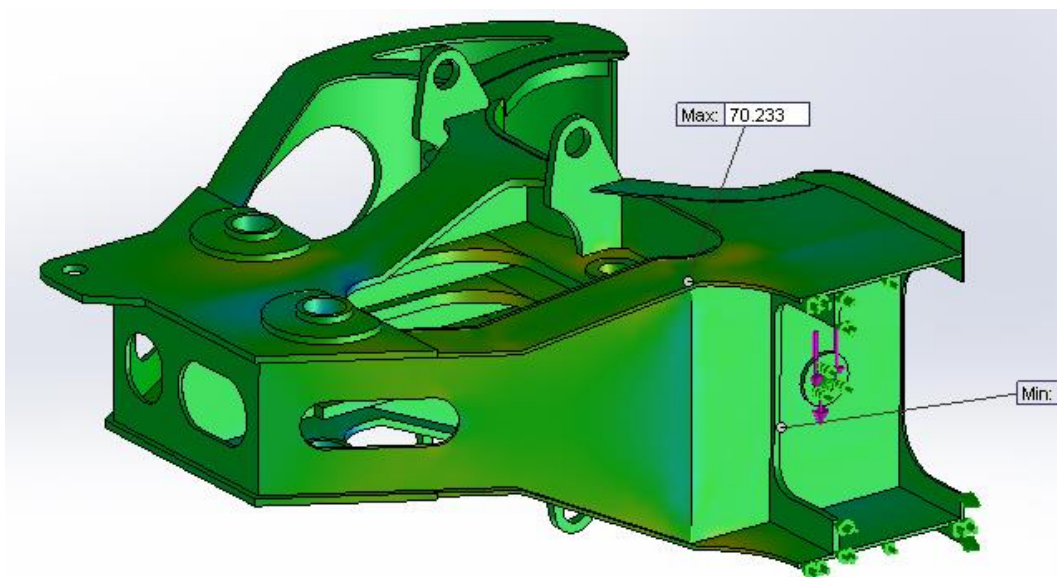
7.2 Runkorakenteen leikkausvoimat

Runkorakenteesta tehtiin myös leikkausvoimien tarkastelu. Tarkastelu tehtiin eri tolppaväleillä x- ja y-akselin muodostaman pinnan suhteen, koska muilla pinnoilla tulokset jäivät hyvin pieniksi. Tällä tarkastelulla voitiin tarkistaa varmistaa muiden tulosten paikkaansa pitävyys ja se, ettei rakenteessa ole suuria yksittäisiä leikkausjännityksiä.

Leikkaus jännityksen positiivinen tai negatiivinen arvo johtuu tarkastelu suunnasta josta kummatkin arvot täytyy ottaa huomioon kestävyys arvioinnissa. Tarkasteluiden kuvista 25 ja 26 voidaan huomata, että leikkausjännitykset eivät nouse yli sallitun myötörajan 115 MPa. Alla olevissa kuvissa 25 ja 26 on näytetty leikkausjännitysten arvot rakenteessa. (Eurokoodi 9, Alumiinirakenteiden suunnittelu osa1-1)



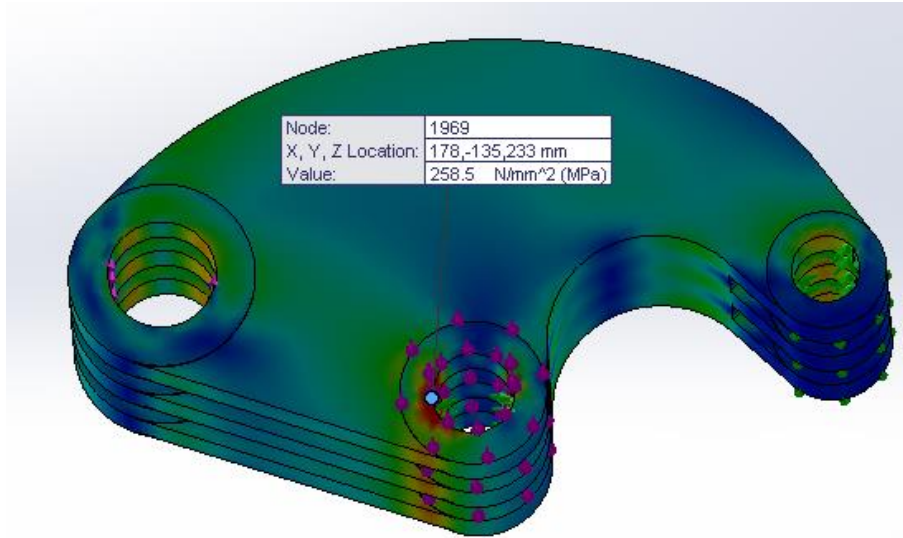
Kuva 25. Y- ja X-akselin muodostaman tason suuntaiset leikkausvoimat



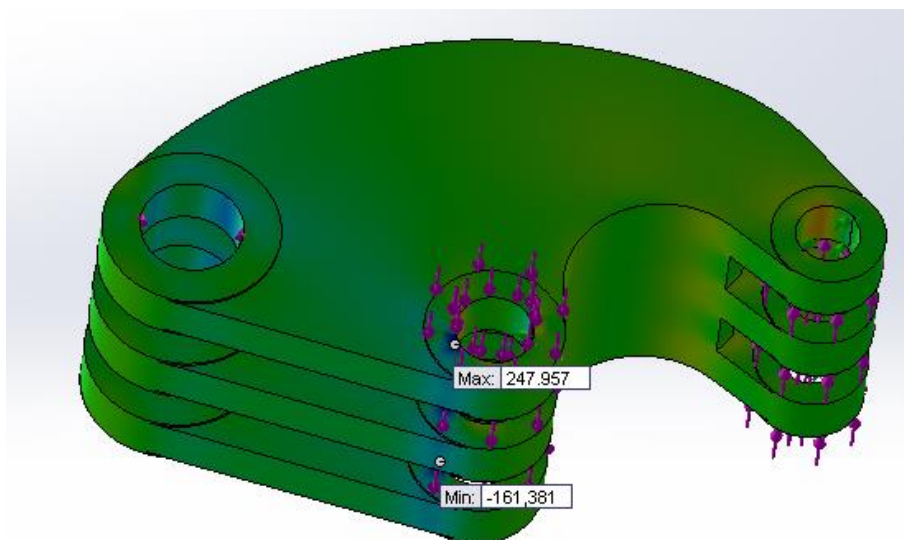
Kuva 26. Y- ja X-akselin muodostaman tason suuntaiset leikkausvoimat keskeltä päin

7.3 Vipuvarren tulokset

Vipuvarsisissa alkuperäisessä rakenteessa jännitykset nousivat liian korkeiksi, joten alkuperäistä rakennetta täytyi muuttaa todella paljon. Uudella rakenteella vipuvarressa esiintyy vain tukitappien sisäpinnoilla kovia jännityksiä, mutta jännitykset ovat pinnoilla eikä saumoissa. Todellisessa tartuntatilanteessa vipuvarren pieni pyöriminen vähentää suurimpia jännityksiä rakenteessa. Muuten rakenteessa jännitykset eivät nouse yli sallitun arvon, joten se kestää lasketut kuormitukset.



Kuva 27. Von Misesin yhdistetyt jännitykset sisemmässä vipuvarressa

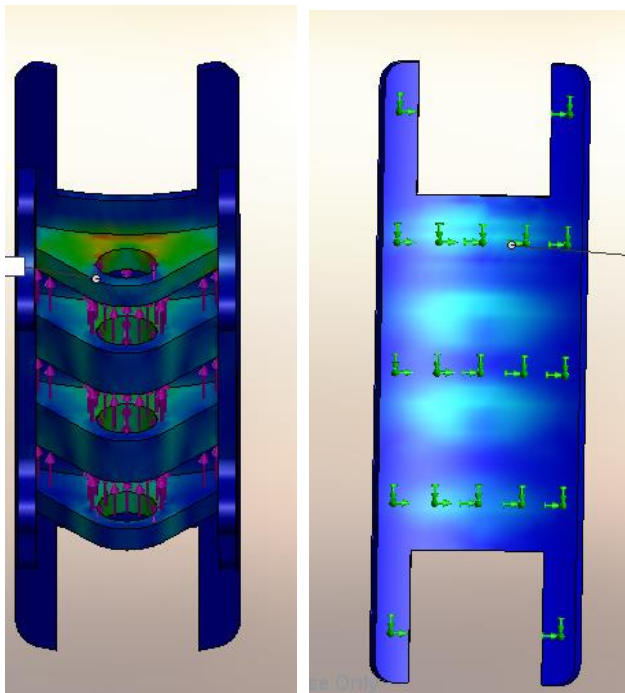


Kuva 28. Ulomman nivelen X- ja Y-akselin muodostaman tason suuntaiset leikkausvoimat.

Maksimi ja minimi arvot ei ole todellisia, koska ne muodostuvat tarkastelun helpottamisen tehdyn puolituksen reunaan (kuva 17).

7.4 Tarraimien tulokset

Tarraimen analyysissa rakenteeseen, etenkin kiinnitystappien aukkojen reunoihin tuli suuria Von Misesin jännityksiä, jotka eivät kuitenkaan olleet yli sallitun. X-akselin ja y-akselin suuntaiset leikkausvoimat jäivät rakenteessa hyvin pieneksi. Ylimmän ja alimman tuen reunoihin muodostui jännitys, joka jää alle 115 MPa:n, mikä on suurin sallittu jännitys rakenteessa. Tulokset on esitetty von Misesin yhdistettynä jännityksenä kuvassa 29. Tulosten perusteella voitiin päätellä rakenteen kestävä kuormitustilanteet. (Eurokoodi 9, Alumiinirakenteiden suunnittelu osa1-1)



Kuva 29. Tarraimen Von Misesin yhdistetyt jännitykset

7.5 Törmäys keskelle

Tartuntatilanteiden lisäksi laskelmat tehtiin kahdelle eri törmäystilanteelle keski- ja sivutörmäykselle. Gripperin rakennetta ei ole suunniteltu kestävään täysin hajoamatta näitä törmäystilanteita. Normaalissa tilanteessa alus kiertyy törmäyskohdan ympäri ja sylinterit, josta gripperi on aluksessa kiinni vaimentavat törmäystä, jolloin törmäysvoima ei ole todellisuudessa laskujen mukainen.

Seuraavassa on esitetty keskitörmäykselle tehty lujuusanalyysi. Tartuntatilanteessa tapahtuvassa keskitörmäyksessä alus ei pysähdy yhtä lyhyellä matkalla kuin tässä laskelmassa. Varmuuden vuoksi kuitenkin laskenta tehtiin suurimmalla teoreettisella törmäysvoimalla.

7.5.1 Törmäysvoima

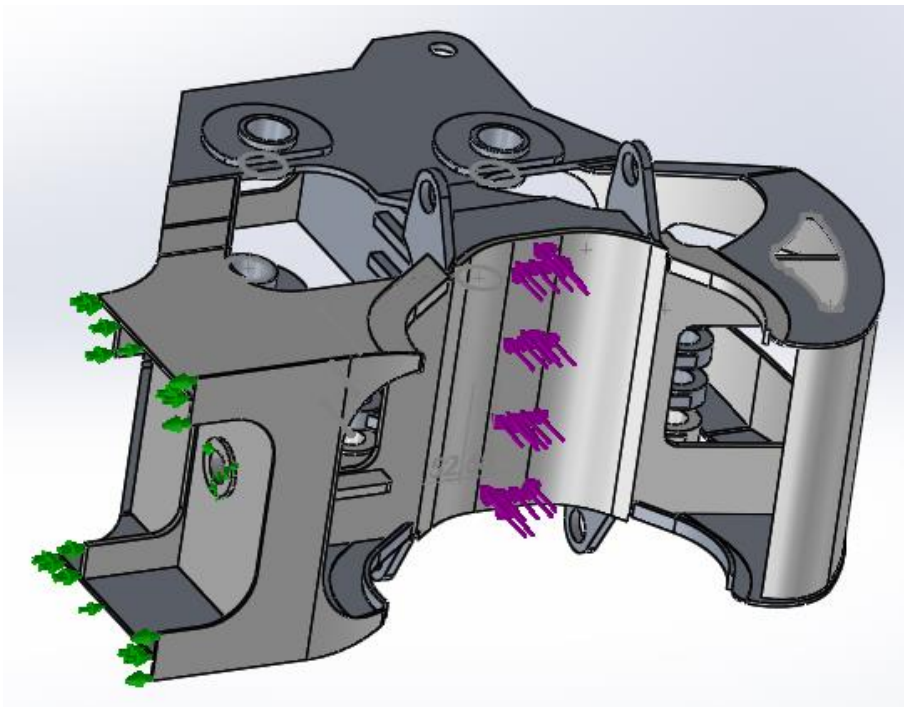
Aluksen törmäys voima on laskettu seuraavilla arvoilla ja kaavalla (Valtanen, 2010), jotka on esitetty taulukossa 6:

Taulukko 6. Törmäysvoimat

Aluksen up- pouma:	m	38000	kg	
Tulonopeus:	v	1,8	kN	
		0,926	m/s	
Keskivaimenti- men vaimen- nusmatka:	s	100	mm	
		0,1	m	
Törmäysvoima:	F	162920	N	$(1/2 * m * v^2) / s$
		163	kN	

7.5.2 Törmäystilanteen reunaehdot ja voimat

Törmäystilanteessa on osittain samat reunaehdot (vihreät nuolet), kuten tartuntatilanteen tarkaste-
luissa. Törmäystilanteen reunaehtoina on symmetria ehto sisäreunassa ja pyörimisen salliva sylinte-
riehto sisäreunan keskellä. Violetit nuolet kertovat törmäysvoiman 163 kN osumakohdan ja suun-
nan.

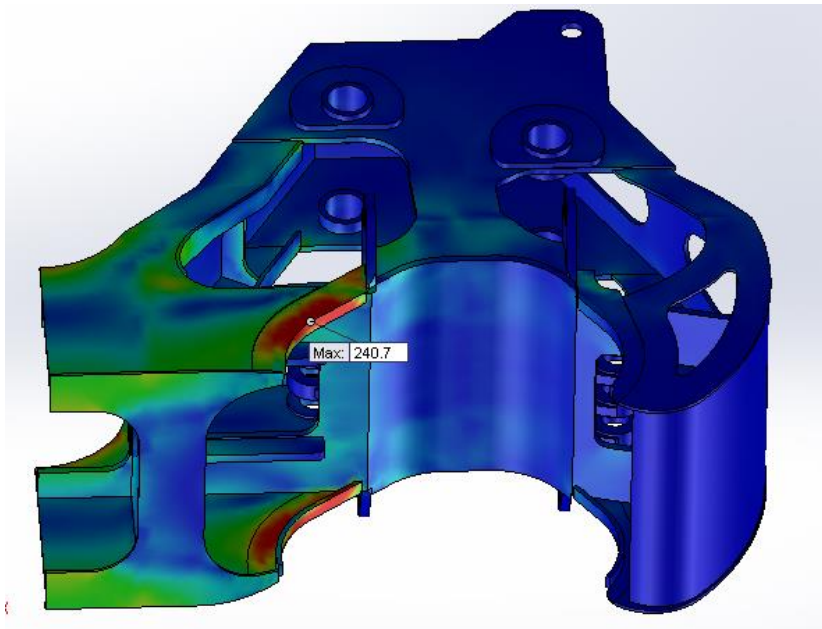


Kuva 30. Keskitörmäyksen reunaehdot ja voimat

7.5.3 Tulokset

Keskitörmäyksessä reunalevyjen jännitykset nousevat hieman yli sallittujen arvojen. Reunatukien rakennetta pitäisi hieman muuttaa vahvemmaksi, mutta se ei onnistu nykyisellä tarrainrakenteella, koska vahvikkeelle ei olisi enempää tilaa. Todellisuudessa aluksen törmäysvoima ei kohdistu pelkästään toiselle puoliskolle, koska alus pyörähtää sen puolen ympäri, joka on osunut ensi tuulivoimalan tukirakenteisiin.

Tulokset on esitetty von Misesin yhdistettynä jännityksenä kuvassa 31. Kuvassa on käytetty väriskaalaa, jossa yli 120 MPa:n yhdistetty Von Mises jännitys tarkoittaa punaista aluetta.



Kuva 31. Keskitörmäyksen jännitykset

8 YHTEENVETO

8.1 Teoria

Tutkimuksen alusta lähtien tuli selväksi, että haastavin osuus tulee olemaan lujuusopin teorian hallitseminen. Elementtimenetelmän täydellinen käyttäminen vaatisi pitkälle vietyjä lujuusopin opintoja, joten tässä tutkimuksessa olevat laskut ovat hieman puutteellisia, mutta erittäin hyvin suuntaa antavia. Teorian opiskelu jäi tällä kertaa hieman vähemmälle ja pääpaino oli saada laskujen tulosten jännitykset oikeisiin paikkoihin ja järkevän suuruisiksi.

Tutkimusta aloitettaessa olemassa oli raportti, jossa esitettiin prototyyppi kappaleen lujuuslaskenta. Raportista ei ollut kerrottu laskennassa käytettyä teoriaa ja hypoteeseja eikä sitä, mihin teoriaan tai tietoon raportissa tehty laskenta ja teksti pohjautui. Raportissa oli esitetty ainoastaan käytettävät arvot ja reunaehdot, ei sitä, miten niihin oli päädytty. Tämä asia johtui varmaan siitä, että laskennan tehnyt yritys ei halunnut esitellä liikaa omaa osaamistaan.

Aluksi työtä vietiin eteenpäin vahvasti tehdyn raportin mukaan. Lukuisista yrityksistä huolimatta prototyypin rakenteen ja uuden rakenteen tuloksia ei saatu samanlaisiksi, samoista lähtöarvoista huolimatta.

Tämän jälkeen täytyi aloittaa laskenta urakka aivan alusta. Täytyi suunnitella aivan oma laskentatapa ja määritellä itse laskennassa käytettävät voimat. Tämän jälkeen tulokset alkoivat olemaan todellisen oloisia. Uudessa laskentatavassa runkorakenne, vipuvarret ja tarraimet laskettiin erikseen omina yksikköinä. Tämä tehtiin sen vuoksi, jotta saatiin laskennasta pois kappaleiden välillä todellisuudessa olevat liikkumapinnat, jotka olisi pitänyt esittää kiinteinä. Lisäksi saatiin kappaleet kiinteästi avaruudessa paikalleen eikä tarvinnut huomioida niiden liikeratoja.

Loppujen lopuksi tulokset näyttivät sen verran todellisia että laskenta voitiin lopettaa siihen. Projekti oli jo kestänyt noin 4 kk, joten tulosten käsin varmistaminen päätettiin jättää pois suuren työmäärän takia. Toimeksiantajakin hyväksyi tulokset ilman käsilaskentaa eikä heidän mielestä ole tarkoituksen mukaista tällaisessa projektissa viedä laskentaa niin pitkälle.

8.2 Suunnittelu

Prototyypin suunnitelleen yrityksen julkaisemassa prototyypin raportista kävi ilmi, että rakennetta ei voida suunnitella alumiinista, koska rakenteessa on liian suuria jännityksiä. Yrityksen tekemää raporttia lukiessa ja lujuusanalyysejä tehdessä kävi kuitenkin ilmi että alumiinille liian suuret jännitykset kohdistuvat hyvin pienelle alueelle. Nämä jännitykset voitiin myös poistaa muuttamalla hieman rakennetta.

Standardeissa alumiinille annettiin muutosvyöhykkeellä eli hitsaussaumoissa 115 MPa maksimijännitys. Teoriassa tämä jännitys ei saisi ylittyä missään osassa Gripperin rakennetta. Todellisuudessa laskujen tulosten jännitykset voivat nousta hieman suuremmiksi levypinnoilla, jotka ovat yli 200 mm:n päässä reunasta, koska silloin jännityksillä ei ole vaikutusta muutosvyöhykkeen kestävyysalueeseen. (Eurokoodi 9, Alumiinirakenteiden suunnittelu osa1-1)

Rakenteen saumoissa ei esiintynyt erittäin pieniä pisteitä lukuun ottamatta yli 115 MPa:n jännityksiä. Kaikkien analyyseiden perusteella Gripperin rakenne kestää kaikki normaalit kuormitustilanteet alumiinista rakennettuna. Nykyisellä rakenteella poikkeuksellisissa törmäystilanteissa rakenne voi kuitenkin hieman hajota. Törmäystilanteiden vaimennusta kuitenkin parannetaan tulevaisuuden versioissa. Teräksen vaihtaminen alumiiniin pudotti Gripperin painoa 56 %, jos mukaan lasketaan vain runkorakenne, vipuvarret ja tarraimet. Todellista painon pudotusta ei voida laskea tarkalleen, kun ei tiedetty muiden Gripperin rakenteessa olevien komponenttien painoa.

Mobimar Oy:n kanssa käydyissä keskusteluissa on suunniteltu, että tuotantoon tulevassa kappaleessa jännityksiä vähennetään myös uusilla nivelratkaisuilla ja tukisylinereillä.

Tämän tutkimuksen tavoite oli osoittaa materiaalivehto ja saada sitä kautta laskettua Gripperin painoa. Tutkimuksessa onnistuttiin saamaan odotettu tulos ja täytettiin annetut vaatimukset. Alussa jo päätettiin että tässä ei haeta vielä tuotantovalmistusta kappaleita vaan se jätetään sitten seuraavaan projektiin.

8.3 Loppusanat

Tutkimus oli hyvin haastava ja aikaa vievä. Työtä täytyi tehdä hyvin itsenäisesti ja opetella asioita itsenäisesti. Koulun puolesta oli haastava löytää asiantuntevaa henkilöä ja yrityksellä on aina omat kiireensä ja heiltäkään ei löytynyt henkilöä, joka olisi voinut neuvoa lujuusopin kanssa.

Yli viiden kuukauden puurtamisen jälkeen oli kuitenkin hienoa saada projekti päätökseen ja tajuta, että haasteita kannattaa jatkossakin ottaa vastaan. Projekti auttoi sietämään kovaa stressiä ja epätietoisuuden tunnetta. Oli myös mukava kuulla kehuja hyvin tehdystä projektista toimeksiantajalta. Tällaisissa projekteissa täytyisi kuitenkin aina muistaa rajata alueet mitä osaa, mitä opettelee ja mitä ei kannata tehdä ja opetella. Lisäksi pitäisi malttaa istua alas opettelemaan asioita kunnolla ennen niiden viemistä käytäntöön.

LÄHTEET

(ei pvm). *Eurokoodi 9, Alumiinirakenteiden suunnittelu osa I-1*.

Hakala, M. K. (1986). *Lujuusopin elementti menetelmä*. Otakustantamo.

Halme, T. (ei pvm). *Mekaniikka ja lujuusoppi II*. Kyamk.

Hietikko, E. (2011). *SoliWorks Tietokoneavusteinen suunnittelu*. Savonia ammattikorkeakoulu.

Immonen, P. (07/2012). *Wind servant raport*.

Insinööritoimisto x. (2012). *Gripper raportti*.

Karhunen J, L. V. (2006). *Lujuusoppi*. Otatieto Oy.

Lähteenmäki, M. (2010). *Elementtimenetelmän perusteet*.

Mobimar Oy. (3 2014). Noudettu osoitteesta www.mobimar.com

Outinen Hannu, T. S. (2004). *Lujuusopin perusteet*. Pressus Oy.

Puro, M. (2014). *Gripper raportti*. MMP-boat.

Valtanen, E. (2010). *Tekniikan taulukkokirja*. Genesis-kirjat.

Wikipedia. (2 2014). *Mathcad*. Noudettu osoitteesta <http://fi.wikipedia.org/wiki/Mathcad>

LIITTEET

Liite 1 Gripper raportti 43 sivua (salainen)

Liite 2 Mathcad laskelmat 4 sivua (salainen)

Liite 3 Rakenne erittely 2 sivua (salainen)